Ж.-П. ЭЙМИШЕН

ЭЛЕКТРОНИКА?..





6Ф0.3
Э 11
УДК 621.37/39

Эймишен Ж.-П.

Э11 Электроника?.. Нет ничего проще!

М., «Энергия», 1970.

248 с. с илл. (Массовая радиобиблиотека, вып. 733)

Книга в занимательной форме знакомит читателя со многими областями одной из наиболее быстро развивающихся в настоящее время наук — электроники. Рассказывается о возможностях использования элекгроники в промышленности

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

3-3-5
326-69 6Ф0.3

J.-P. ŒHMICHEN
L'Electronique? ...Rien de plus simple!
Société des éditions radio

Предисловие к русскому изданию

Предлагаемая читателю книга Ж.-П. Эймишена «Электроника?.. Нет ничего проще!» является удачной попыткой популяризации одной из наиболее обширных областей науки и техники. Автор описал основные принципы электроники в виде беседы двух друзей — Любознайкина и Незнайкина, известных советскому читателю по книгам Е. Айсберга, переведенным на русский язык и изданным Массовой радиобиблиотекой издательства «Энергия». Достоинство книги заключается в многообразии рассматриваемых устройств, сочетающемся с простотой и доступностью изложения, большое внимание в котором уделено объяснению физического смысла описываемых явлений.

Само собой разумеется, что в одной книге невозможно охватить все без исключения разделы электроники, но автор и не ставил перед собой такую задачу. Его цель — заинтересовать читателя наукой, которая так глубоко проникла в нашу жизнь. Насколько это автору удалось, будут судить читатели, начиная от школьников, знакомых с основами физики, и кончая техниками и даже инженерами, работающими в смежных с электроникой областях.

Редактор

Оглавление

то время, когда Незнайкин и Любознайкин учили его основам радиотехники. Именно по этой причине иллюстрации на полях книги сделаны так, как будто наши два приятеля находятся точно в том же возрасте, в каком они были в книге «Радио?.. Это очень просто!», ибо эти персонажи вечно сохраняют свою молодость.

Автор старался как можно внимательнее выслушать указания, которые Незнайкин и Любознайкин давали ему во время его работы. Если ему удалось не исказить столь знакомых всем специалистам по радиоэлектронике действующих лиц, то он будет считать себя полностью удовлетворенным, ибо эти два персонажа еще раз облегчат тысячам молодых людей (всех возрастов!) приобщение к чудесному новому миру, каким является Электроника.

Ж.-П. Эймишен

Беседа первая

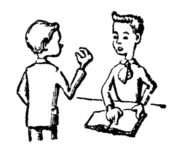
Попытка Незнайкина сделать электронную систему сигнализации тревоги для обнаружения воров наполовину провалилась. Любознайкин указывает ему на недостатки его системы и подсказывает лучшее решение. Но, чтобы воспользоваться этим решением, Незнайкин должен пополнить свои познания в области электроники. Сформулировав определение электроники, Любознайкин советует ему повторить все, что он знает по радиотехнике, чтобы подготовиться к последующим беседам.

Первое знакомство

Плохо продуманная защита

Незнайкин — А! Здравствуй, Любознайкин! Наконец-то ты пришел!

Любознайкин — Здравствуй, Незнайкин. Почему ты говоришь «наконец», ведь я не опоздал?



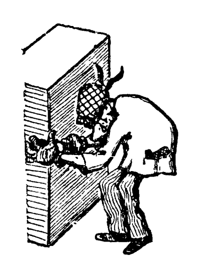
Н. — Нет, но я с нетерпением ждал тебя. Лишь ты можешь дать мне полезный совет... Я одновременно восхищен и очень огорчен: мое устройство не работает, но это увлекает и...

Л. — Не можешь ли ты выражаться хоть чуточку яснее. Я абсолютно не понимаю, о чем идет речь.

Н. — Ну так вот. Несколько дней тому назад один из моих друзей, ювелир, попросил меня сделать ему небольшую систему защиты от взломщиков. О! Он совершенно не хотел ничего сверхъестественного; по его словам требуется простенькое устройство, которое позволило бы ему немного уменьшить риск оказаться сбокраденным. Те небольшие ценности, которые он хранит в своем сейфе, не оправдывают установки сложной и дорогой системы, и он спросил меня, не соглашусь ли я заняться этой проблемой.

Л. — Это увлекательно. Надеюсь, ты принял предложение?

Н. — Естественно. Но нужно было найти приспособление для обнаружения возможного вора. Я подумал использовать для этой цели микрофон...



Л. — Эх!

Н. — Ты, кажется, не очень одобряешь мое решение. Действительно, прежде чем приступить к опыту, мне надлежало проконсультироваться с тобой. Около сейфа моего друга я поставил микрофон и соединил его со своим усилителем, к выходу которого вместо громкоговорителя через выпрямитель подключил реле (рис. 1), включающее звонок в комнате моего друга, проживающего тремя этажами выше.

Л. — Идея сама по себе неглупа, но я совершенно не верю в эффективность построенной на ней системы. Ты опробовал ее на практике?

Н. — Конечно. Сначала я изобразил, что взламывают сейф; реле сработало. Я был очень доволен, все казалось мне прекрасным. Вечером я привел систему в боевую готовность, и... мой друг всю ночь не спал.

Л. — О! Я очень живо представляю себе. Много раз за ночь вооруженный до зубов он крадучись спускался в свой мага-

От автора

Первоначально эта книга была всего лишь тем, что парижские студенты называют «канюларом» (испытанием для новичка).

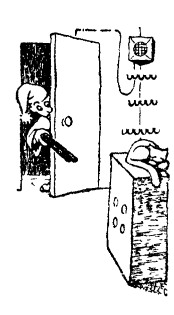
После усвоения основных понятий радиотехники по книге Е. Айсберга «Радио?.. Это очень просто!», чувство восхищения которой автор этих строк сохранил навсегда, в один прекрасный день нам пришла в голову идея воспользоваться стилем этой книги, чтобы объяснить одному из наших друзей принцип работы следящей системы. От этого до подражания ради забавы оставался лишь один шаг, который мы с легким сердцем и сделали.

Было очень занятно заставить Любознайкина и Незнайкина вести почти подпольную жизнь в тайне от их духовного отца.

В процессе написания различных глав, постоянно руководствуясь ценными советами настоящего отца Незнайкина и Любознайкина, автор обнаружил, что он не мог «как ему угодно» распоряжаться нашими приятелями. Незнайкин и Любознайкин, оставаясь всегда молодыми, имеют уже продолжительную историю, на протяжении многих лет которой они так блестяще подготовили более двух поколений радиотехников, а затем и специалистов по радиоэлектронике. При этом прочно сформировалась их индивидуальность.

Следовательно, автор оказался в положении режиссера, который может дать занятым в его фильме или пьесе звездам указания, но не может заставить их мыслить по-своему. Впрочем, такое явление не ново: многие авторы романов неоднократно чувствовали, как над ними доминируют и как ими руководят их собственные персонажи, абсолютными хозяевами которых они себя считали.

В этих условиях единственным возможным для автора решением было предоставление нашим обоим приятелям максимально возможной свободы действий, и тогда написание различных глав стало значительно легче. Автор почувствовал себя моложе более чем на 20 лет и вновь пережил



зин,.. потому что какой-нибудь автомобиль резко затормозил перед его домом или потому что он запер в своей лавочке кошку.

Н. — Примерно так, во всяком случае в том, что касается юмористической стороны этой истории; особенно, когда я вспоминаю, что мой друг говорил утром о моих способностях, о моей изобретательности и о моем будущем в радиотехнике...

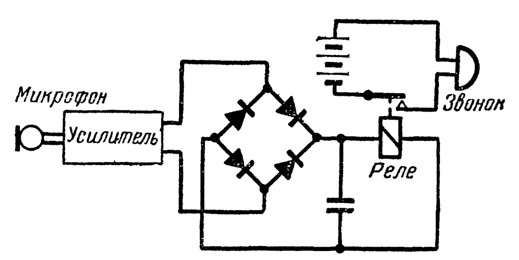
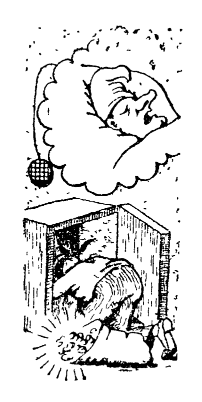


Рис. 1. Попадающий в микрофон звук усиливается, затем детектируется и замыкает реле и тем самым предупреждает ювелира о присутствии злоумышленника, взламывающего сейф (или увы! сообщает о любом шуме-помехе).



Л. — Я очень хорошо представляю себе это, мой бедный Незнайкин. Впрочем я должен тебе сказать, что твоя система, так часто понапрасну подающая сигнал тревоги, в случае настоящего ограбления могла преспокойно не сработать.

Н. — Ну нет! Невозможно, ведь я лично ее проверил.

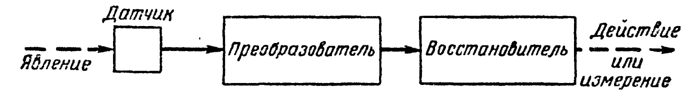
Л. — Но ведь ты, Незнайкин, не взломщик. Представь себе на минуту, что делает вор, проникающий ночью в магазин: он старается производить как можно меньше шума. Подойдя к сейфу, он ищет защитную систему и не может не увидеть твоего микрофона. Он поспешит накрыть его чем-нибудь, чтобы сделать глухим. Не исключено, что это ему удастся.

Нет, поверь мне, ты неудачно выбрал датчик.

От радио к электронике

Н. — Что ты называешь «датчиком»?

Л. — Видишь ли, Незнайкин, во всяком электронном аппарате имеется часть, именуемая «датчиком» (рис. 2), которая улавливает или, как говорят, «дает» явление, которое предстоит обна-



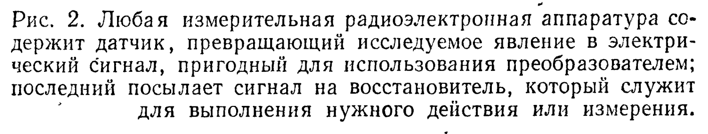
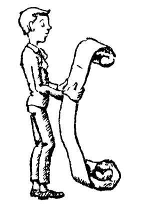


Рис. 2. Любая измерительная радиоэлектронная аппаратура содержит датчик, превращающий исследуемое явление в электрический сигнал, пригодный для использования преобразователем; последний посылает сигнал на восстановитель, который служит для выполнения нужного действия или измерения.

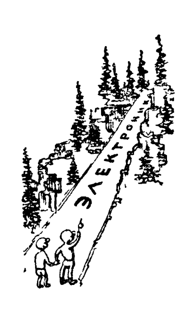


ружить и измерить или использовать. Другая часть получает от датчика электрический сигнал и преобразует его, придавая ему нужные характеристики; эту часть называют «преобразователем». И, наконец, существует последняя часть «восстановитель»,

которая получает преобразованный электрический сигнал и по нему выполняет действие, которое ожидают от всей установки.

Н. — Это все дьявольски сложно. Я предпочел бы один хороший конкретный пример.

Л. — Хорошо, в твоем устройстве датчиком служит микрофон, «переводящий» подлежащее обнаружению явление (шум) в электрический сигнал. Роль преобразователя у тебя выполняет усилитель, увеличивающий мощность выработанного микрофоном-датчиком сигнала. Восстановителем служит реле и приспособление, подающее сигнал тревоги.



Н. — Но чем, кроме микрофона, мог я (если пользоваться твоим выражением) уловить шум?

Л. — В этом случае следовало бы ориентироваться не на шум, а на какие-либо другие признаки присутствия вора, например, на попадание его в луч света. Лучше воспользоваться инфракрасным лучом, чтобы злоумышленник ничего не видел и не чувствовал себя обнаруженным, тогда с помощью фотоэлемента...

Н. — Сжалься, Любознайкин! Ведь я ничего этого не знаю. Инфракрасные лучи, фотоэлементы и все прочее чрезмерно сложно для меня! И мне придется по крайней мере сдать экзамены на диплом по общей физике, чтобы суметь понять кое-что,.. но до этого, поверь мне, пройдет не одна бессонная ночь!

Л. — Перестань заблуждаться, Незнайкин. Ты можешь прекрасно разобраться в электронике и без капитального университетского теоретического курса; твои познания в области радиотехники тебе очень помогут. Я скажу даже больше: ты не только можешь, но и должен понять электронику. Ты молод и тебе необходимо идти в ногу со временем. В эпоху искусственных спутников, радиолокации далеких планет, электронных вычислительных машин со сложными программами, ядерной техники и промышленной электроники ты уже не можешь довольствоваться лишь знанием радиоприемника. Тебе нужно расширять свой кругозор...

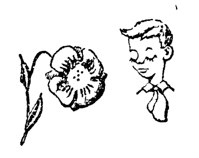


Н. — О, какое красноречие! Можно подумать, что я нахожусь в Бурбонском дворце [1]. Но в одном отношении ты несомненно прав: я полностью согласен, как ты говоришь, «расширить свой кругозор». С чего следует начать? Я надеюсь, что ты не будешь говорить мне о математике...

Л. — Успокойся. Немного более глубокие, чем твои познания математики (а они-то, как мне кажется, уж не столь обширны), позволят лучше описать явления; но на мой взгляд, формула или уравнение еще никогда не объясняли принцип действия. Поэтому, прежде чем обращаться к алгебре, нужно понять физическую сторону явления.

И возвращаясь к твоему вопросу, я советую тебе начать с ... начала, т. е. с различных датчиков.

Н. — Ну, так приступим к делу! Объясни мне, как работает фотоэлемент: таким образом, я узнаю все о датчиках.



Л. — Ты просто воплощение скромности, рядом с тобой бледнеет даже фиалка [2]. Когда ты узнаешь, как работает фотоэлемент (впрочем это не единственный используемый в электронике светочувствительный прибор), ты все же не сможешь считать, что знаешь «все» о датчиках, ибо существует такое множество разнообразных датчиков...

---

[1] Дворец в Париже, в котором проводятся заседания Национального собрания Франции (*Прим. перев.*).

[2] Во французском языке фиалка служит символом скромности (*Прим. перев.*).

Н. — А что могут воспринимать датчики, кроме света и звука?

Л. — По правде говоря, очень немногие явления: скорость, ускорение, давление, вибрацию, силу, вращающий момент, радиоактивное излучение, температуру, проводимость, кислотность, влажность...

Н. — Сжалься, Любознайкин! Не кидай в меня больше этими названиями! Это ужасно, и мне никогда не удастся ознакомиться со всеми существующими датчиками. Я предпочитаю немедленно же отказаться от своей затеи освоения электроники.

Методичность изучения



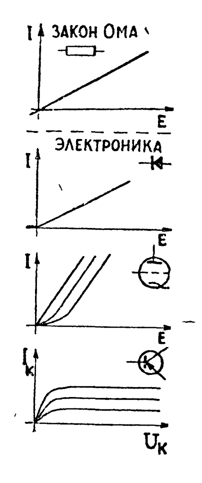
Л. — Ты абсолютно неправ. Разве шесть месяцев тому назад, занявшись английским языком, ты не пришел в отчаяние, узнав, что, даже выучив четыре тысячи слов, можно не знать всего языка Шекспира? В твоем возрасте вполне естественно желание знать «все» в том или ином вопросе, но было бы очень хорошо (и очень полезно), если бы тебе удалось изучить некоторое количество датчиков и способы их использования.

Н. — Все ясно. Ты заставишь меня заниматься электроникой попусту...

Л. — Но, Незнайкин, когда ты, наконец, освободишься от своей боязни математики? Разве ты считаешь, что я заставлял тебя «попусту заниматься радио?» Конечно, нет. Поверь: я могу научить тебя многому интересному из электроники, после чего ты сможешь пополнять свои знания чтением книг, журналов и особенно практическими занятиями. Тебе не так уж трудно будет следовать за мною в начале, но после нескольких наших бесед ты сам удивишься, какое множество статей, которые сейчас могут тебя обескуражить, станут тебе понятными.

Н. — В принципе ты несомненно прав. Ты расскажешь мне некоторые подробности об устройстве датчиков, и я познаю электронику, потому что по своей сути электроника — то же самое радио.

Проблема определения



Л. — Абсолютно с тобой не согласен. Если хочешь, скажи, что радио — это электроника, потому что с радио начиналась электроника. Я знаю многих специалистов по электронике, которые за десять лет практической работы ни разу не прикасались к антенне, громкоговорителю или микрофону.

Н. — Но тогда, прежде чем идти дальше, скажи мне, что ты понимаешь под электроникой?

Л. — Наконец-то мы добрались! Нужно сказать, что я долго искал подходящее определение... Видишь ли, Незнайкин, ты задаешь довольно сложный вопрос. Я постараюсь ответить тебе, сказав, что электроника — это область техники, использующая движение электрических зарядов во многих средах, кроме металлов (в вакууме, ионизированных газах, полупроводниках), и которая, имея дело с электричеством в почти «чистом виде», практически не знает инерции. Для замыкания или разрыва электрической цепи обычными средствами требуется переместить два проводника, обладающие определенной массой, чтобы соединить их или отодвинуть один от другого. На это требуется некоторое время. Если же воздействовать на заряды, практически не имеющие массы, то все происходит значительно быстрее.

Время в электронике исчисляется в микросекундах (*мксек*), . е. в миллионных долях секунды; здесь в качестве единицы змерения времени также используются даже миллиардные доли екунды — наносекунды (*нсек*). И, наконец, по-моему, можно казать, что электроника начинается там, где кончается закон)ма.

Н. — Но это совсем не годится. В усилителе (а это — электонный аппарат) имеются порядочные резисторы, которые полостью подчиняются закону Ома!

Л. — Не приписывай мне то, чего я не сказал! Электроника пирается на «неомические» элементы, но она использует также лассические электротехнические элементы и именно по этой ричине знание общей электротехники необходимо для электроники еще в большей степени, чем для более ограниченной области радио.



Н. — Хорошо, допутим. Но тогда, как нам хватить все гигантское оле знаний, каким является электроника? (Как ы видишь, твое красноечие явно заразительно.)

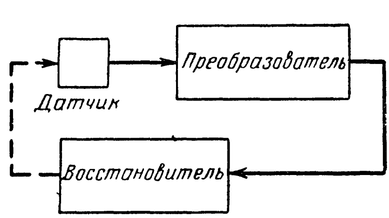


Рис. 3. В замкнутой системе восстановитель воздействует непосредственно на датчик.

Л. — Я полагаю, что казал тебе на самое лавное. Мы будем говоить о датчиках, о элекронной части, которая реобразует поступающий с датчика сигнал, и затем о восстановиеле, который производит нужное действие. С целью пополнения воих знаний о некоторых электронных схемах, которые будут ам полезны, мы займемся изучением электронного счета и его спользования в электронных вычислительных машинах. И, наконец, используя воздействие восстановителя на датчик (рис. 3), . е. сделав «замкнутую систему», мы создадим сервомеханизмы следящие системы) и аналоговые счетные электрические системы. Если после этого ты почувствуешь себя еще в форме, то мы поговорим также о широко используемом измерении времени, а затем осмотрим, что электроника может дать биологии, астрономии...



Н. — Пожалей меня, иначе я не выйду отсюда живым!

Л. — Ты преувеличиваешь опасность. Желаешь ли ты наать наши занятия завтра?

Н. — Лучше послезавтра. А я тем временем перечитаю все о, что ты рассказал мне в свое время о радио.

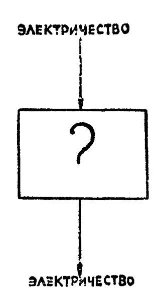
Л. — Превосходная идея. Это будет тебе исключительно олезно. Но особое внимание обрати не на подробности из облати радио, а на разделы, посвященные общей электротехнике, лектронным лампам и транзисторам.

■

Беседа вторая

Наши друзья говорят о «датчиках» — приборах, которые преобразуют изучаемые физические явления в электрический сигнал. Даже если это исходное явление само по себе имеет электрическую природу (постоянное или слишком высокое напряжение), иногда тем не менее нужен датчик. Существуют датчики магнитных величин. При изучении механических усилий в качестве датчика можно использовать специальные резисторы, сопротивление которых изменяется, например, вследствие их удлинения под воздействием силы; при этом сопротивление обычно измеряют мостом Уитстона. И, наконец, вибрирующие струны и пьезоэлектрические элементы также могут использоваться в качестве датчиков, превращающих механические воздействия в электрические сигналы.

Датчики электрических и магнитных величин. Механические датчики



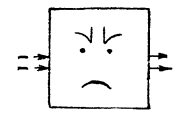
Любознайкин — Ну как, Незнайкин, ты сегодня в форме?

Незнайкин — Да, все в порядке. Правда, я недостаточно хорошо понимаю некоторые формулы, но в целом довольно легко перечитал свои записи, сделанные во время наших первых бесед. И раз уж сегодня мы решили говорить о датчиках, расскажи мне, как работают знаменитые фотоэлементы

Л. — Пока еще рано, Незнайкин. Мы начнем с датчиков, чувствительных к воздействию электричества.

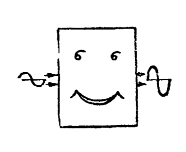
От электричества ... к электричеству

Н. — Любознайкин, да ты смеешься надо мной! Ты сказал мне, что датчик преобразует изучаемые физические явления в электрический сигнал. Если же физическое явление уже само по себе электрическое, то «давать» нечего — работа датчика уже выполнена!



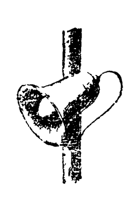
Л. — Должен признать, что в некоторых случаях ты прав, но не во всех. Может случиться так, что «электрическое явление» непосредственно использовать нельзя. Тогда, чтобы сделать его пригодным к использованию, нужно модифицировать его с помощью «преобразователя». Выполняющее такое преобразование устройство представляет собой настоящий датчик. И вот первый пример: предположим, что мы имеем дело с очень небольшим постоянным напряжением, что ты сделаешь?

Н. — Для начала я подам это напряжение на усилитель...



Л. — Именно этого я и ожидал! Но, Незнайкин, усилители, которые ты знаешь, усиливают лишь переменные напряжения. Правда, вскоре мы будем говорить и о схемах, способных усиливать также и постоянные напряжения, но, как ты увидишь, эти аппараты явно предпочитают использовать достаточное входное напряжение, в противном случае приходится чрезмерно повышать их коэффициент усиления, «уход» которого может оказаться для нас серьезной помехой. Нет, несомненно лучше преобразовать наше небольшое постоянное напряжение в переменное...

Н. — Ну, здесь-то я могу сказать, что в этом случае ты не воспользуешься трансформатором, потому что он пригоден только для преобразования переменных напряжений.



Л. — Ты совершенно прав. Я воспользуюсь специальным вибропреобразователем, именуемым «прерывателем». Это очень тщательно сделанное и, к сожалению, весьма дорогое реле, которое заставляют очень быстро вибрировать. Если ты посмотришь на изображенную ниже схему (рис. 4), то увидишь, что напряжение e на входе схемы равно напряжению на входе усилителя $U_{\text{вх}}$, когда контакт K вибропреобразователя разомкнут (мы предполагаем, что входное сопротивление усилителя по сравнению с R велико). Но когда контакт K замкнут, напряжение $U_{\text{вх}}$ почти равно нулю, естественно при условии, что сопротивление контакта K по сравнению с R мало. Следовательно, напряжение $U_{\text{вх}}$ переменное, а точнее оно представляет собой переменную составляющую, которую усилитель усиливает без искажений и которую мы после этого детектируем.

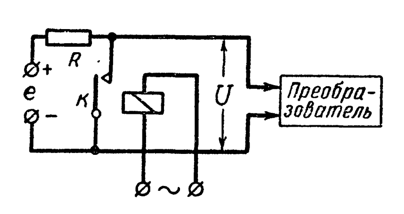
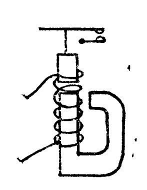


Рис. 4. Периодически замыкающийся и размыкающийся контакт K преобразует постоянное напряжение e в переменное U, которое легче усилить (маленький прямоугольник обозначает катушку с магнитным сердечником).

Н. — Эта система очень хитрая. Но как ты заставишь контакт K вибрировать?

Л. — Посмотри внимательно на схему: я посылаю в катушку переменный ток, например, с частотой 50 *гц*. В этой катушке имеется магнит, который заставляет реле замыкаться только 50 раз в 1 *сек*, а не 100...

Н. — Я знаю, в чем заключается эта хитрость: именно такой метод применяется в головных телефонах или в старых магнитных громкоговорителях. Но скажи мне, нельзя ли здесь использовать тот же метод, что и в динамических громкоговорителях, и заставить подвижную катушку приводить в действие контакт?



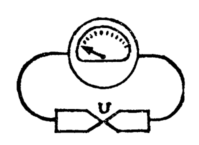
Л. — Это не только возможно, но уже начинает применяться на практике, и я думаю, что этому методу принадлежит будущее.

Н. — Хорошо, это мне больше нравится. Но почему ты сказал, что эти специальные реле так дороги? Ведь скорость его срабатывания не так уж велика.

Л. — Подумай сначала о количестве срабатываний, которое должен выдержать контакт. При 50 замыканий и размыканий в секунду это составит 180 000 в час или 4 300 000 в день.

Н. — Сжалься и не говори мне, сколько это составит в месяц, я и без этого уже чувствую себя уставшим!

Л. — Реле устанет раньше тебя: модели хорошего качества выдерживают не более 100 *ч* работы. А, кроме того, необходимо также, чтобы катушка не наводила никаких напряжений в образованной контактом цепи, не говоря уже о возможных остаточных напряжениях, которые могут возникнуть, когда контакт реле замыкается.



Н. — Ну, с этим-то я не согласен! Когда два металлических элемента соприкасаются, цепь замыкается накоротко, разве не так?

Л. — Да, если эти два металла идентичны. Но когда начинают измерять напряжения в милливольтах, все оказывается не



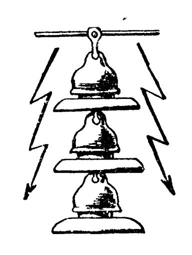
так просто. И, наконец, запомни, что такие вибропреобразователи сложны в изготовлении ... и весьма дороги.

Н. — И, следовательно, мы завершили главу о датчиках, которые ты называешь датчиками электрических величин.

Очень высокие напряжения

Л. — Ну, до этого еще далеко. Правда, при всем желании мы не сможем рассмотреть всего, но я хотел бы спросить тебя, как думаешь ты использовать высокое переменное напряжение, например 30 000 *в*?

Н. — Прежде всего я буду очень осторожен.

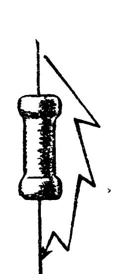


Л. — И ты несомненно прав. Но этого недостаточно, ибо это напряжение все же нужно использовать. Я надеюсь, ты не станешь подавать это напряжение непосредственно на сетку усилителя?

Н. — Оставь, пожалуйста, свой сарказм: я уже наговорил немало глупостей, но все же не дошел до такого абсурда. Для начала я приложу это напряжение к потенциометру...

Л. — Ой, ой! Если ты возьмешь обычный потенциометр, то он просто взорвется. Не следует все же забывать, что напряжение 30 000 *в* может дать искру в воздухе более 40 *мм*. В случае необходимости ты можешь сделать специальный делитель напряжения, показанный на рис. 5. Отношение напряжения на выходе к напряжению на входе делителя равно:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}=\frac{r}{R+r}.$$



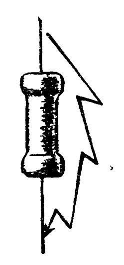


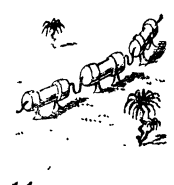
Рис. 5. Делитель высокого напряжения $U_{\text{вх}}$; сопротивление R состоит из большого количества резисторов, благодаря чему напряжение на каждом резисторе не слишком высокое.

Н. — Хорошо. На мой взгляд, все это правильно, но почему сопротивление R состоит из нескольких последовательно соединенных резисторов?

Л. — Я нарисовал всего лишь четыре резистора, а на самом деле их придется поставить более ста, чтобы на выводах каждого из них было не более 300 *в*. За исключением специальных моделей резисторы не выдерживают большего напряжения. Но обрати внимание, что, несмотря на деление, полученное напряжение все еще относительно велико. Не забывай, что наше напряжение переменное и, следовательно, неизбежно проявляется паразитная емкость C, параллельная резистору r: это емкость соединительных проводов и емкость входа твоего электронного устройства, на которое ты подашь снятое с r напряжение.

Н. — Ну и что же? Мне от этого не жарко и не холодно.

Л. — Да от этого у тебя должен бежать мороз по спине! На данной частоте твой конденсатор C может иметь не бесконечное сопротивление по сравнению с сопротивлением резистора r, тогда кратность твоего делителя напряжения упадет.



Н. — Транзистор меня побери! Об этом-то я не подумал! Неужели ничего нельзя сделать? А, вот и придумал: нужно уменьшить R и r!

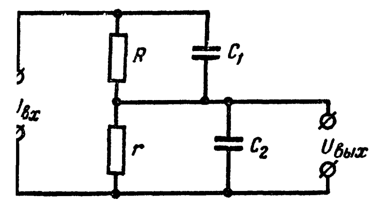
Л. — Осторожно, иначе ты чрезмерно увеличишь расход энергии от источника $U_{\text{вх}}$. Может случиться так, что источник



удет не в состоянии дать требуемую энергию, а кроме того, то привело бы к рассеянию на резисторах R чрезмерного количества энергии.

Н. — Мне пришла идея! Раз все наши неприятности происходят из-за паразитной емкости на выводах резистора r, то положение, вероятно, можно исправить, если поместить на выводах резисторов R соответствующий конденсатор.

Л. — Очень хорошо, Незнайкин, превосходная идея. Так действительно и делают, при этом компенсация будет безукоризненной, если (см. рис. 6) $RC_1 = rC_2$, где C_2 — паразитная емкость. Можно еще упростить схему, если ограничить ее применение не слишком низкими частотами; тогда получим емкостный делитель напряжения, схему которого я изобразил на рис. 7.



ис. 6. Для создания апериодического делителя напряжения $R - r$ чтобы отношение $U_{вх}/U_{вых}$ не зависело от частоты) необходимо сделать $RC_1 = rC_2$.

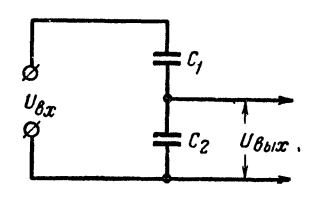


Рис. 7. В тех случаях, когда приходится иметь дело только с переменными напряжениями, делитель напряжения можно сделать на двух конденсаторах.

предполагаю, что входное сопротивление $R_{вх}$ прибора, на который подается уменьшенное делителем напряжение $U_{вых}$, почти бесконечно по сравнению с реактивным сопротивлением C_2; я могу сказать, что в каждый полупериод через C_1 и C_2 проходят одинаковые заряды. Отсюда можно вывести, что $U_{вых}C_2 = (U_{вх} - U_{вых})\, C_1$, откуда выводим...

Н. — Нужный результат; я полностью тебе в этом доверяю.

Л. — Одной строки расчетов достаточно, чтобы установить, то

$$\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Н. — Это почти такая же формула, что и для делителя напряжения на резисторах. И я уже догадываюсь, сейчас ты скаешь, что паразитная емкость не имеет значения, что достаточно меньшить C_2...

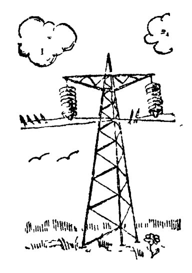
Л. — Совершенно верно. Незнайкин, ты делаешь успехи, рими мои поздравления.

Н. — Прошу тебя, не надо лишнего, я всегда такой. Но есомненно здесь нас ожидают такие же неприятности с конденсатором C_1, какие мы испытали минуту тому назад с резистором R. На этот конденсатор обрушивается все напряжение $U_{вх}$, ты наверное предложишь включить последовательно целую отню?



Л. — Совсем нет, и именно в этом заключается основное достоинство делителя напряжения этого типа: конденсатор C_1 имеет очень малую емкость, и поэтому очень легко сделать, чтобы н выдерживал все напряжение $U_{вх}$. Например, можно воспольь-

зоваться куском высоковольтного кабеля с внешней медной оплеткой и с полиэтиленовой изоляцией, как в коаксиальном кабеле. Используя в качестве обкладок конденсатора центральную жилу и металлическую оплетку, можно легко получить емкость C_1 в несколько пикофарад.



Датчики электрического поля

Н. — Мне в голову пришла одна занятная идея.

Л. — Вообще это довольно опасно, но тем не менее скажи, что тебя осенило.

Н. — Твоя шутка оказалась неудачной, моя идея как раз имеет целью устранить опасность. Речь пойдет об измерении напряжения на высоковольтных воздушных линиях, рассчитанных на 60 000 или 200 000 *в*. Внизу на расстоянии в несколько десятков метров от токонесущих проводников можно было бы расположить параллельно им провод, который будет выполнять роль второй обкладки конденсатора C_1 (рис. 8), вот и весь фокус!

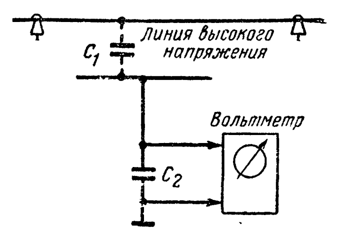


Рис. 8. Емкостный делитель очень высоких напряжений: конденсатор C_1 образован высоковольтной линией и расположенным неподалеку от нее проводом.

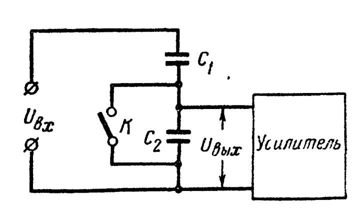


Рис. 9. При получении напряжения с помощью емкостного делителя нельзя пользоваться методом замыкания — размыкания, изображенным на рис. 4.



Л. — Еще раз прими мои поздравления, дорогой Незнайкин. Твоя идея уже применяется. Однако ее практическое осуществление сопряжено с некоторыми трудностями (нужно всегда одинаково располагать вторую обкладку конденсатора C_1 относительно высоковольтного провода, учитывать наличие других высоковольтных проводников поблизости от интересующего нас провода). Своей идеей ты даешь мне повод, о котором я давно подумывал, рассказать тебе о датчиках электрического поля. Описанное тобою устройство представляет собой один из таких датчиков, но его можно применять лишь для переменных электрических полей.

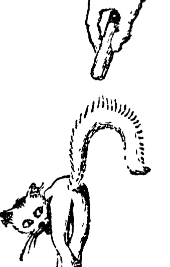
Н. — А, да. Но прежде чем приступить к дальнейшему изложению, скажи мне все же, что ты подразумеваешь под «электрическим полем».

Л. — Очень просто — это состояние любого участка пространства поблизости от электрических зарядов, в результате чего на все помещенные в этот участок пространства электрические заряды воздействует определенная сила. Когда ты натираешь пластмассовую палочку, вокруг нее возникает электрическое поле, притягивающее легкие предметы. В электронной лампе между катодом и анодом существует электрическое поле, которое притягивает электроны к аноду.

Н. — Понимаю, но тогда моя система пригодна для всех полей. При измерении постоянного поля следует лишь воспользоваться одним из вибропреобразователей, о которых ты мне недавно говорил...



Л. — Какой ужас! Предположим, что мы сделаем предложенное тобой устройство (рис. 9). Я заменяю электрическое поле батареей с очень высоким напряжением $U_{вх}$, включенной последовательно с конденсатором C_1. При включении на некоторое время вибропреобразователя K конденсатор C_2 полностью разрядится и его заряд больше не восстановится; напряжение $U_{вых}$ будет упорно оставаться равным нулю. Нет, вибропреобразователь для нашей цели положительно не годится; но ты прав, когда хочешь преобразовать нечто постоянное в нечто переменное, которое легче использовать; только преобразовывать в этом случае нужно не напряжение, а само электрическое поле.



Изнуряющая гимнастика

Н. — Это можно осуществить, если к заряженному проводнику, создающему поле, подносить и быстро отодвигать металлический предмет, соединенный с конденсатором C_1.

Л. — Идея хороша, но я не думаю, что тебе удастся осуществить движение этого металлического предмета туда — сюда со значительной амплитудой и с частотой 50 колебаний в 1 *сек*; если же ты способен на такое, то тебе нужно выступать в цирке! Лучше поместить соединенную с конденсатором C_1 металлическую деталь P в металлический ящик B (рис. 10), а перед ним установить фигурный диск $Д$, приводимый в движение двигателем M. Диск то закрывает, то открывает отверстие O; деталь P подвергается воздействию электрического поля, когда отверстие O открыто, и находится вне этого поля, когда отверстие перекрыто диском. На конденсаторе C_1 возникает переменное напряжение, и его остается лишь усилить с помощью усилителя, называемого электрометрическим, о котором мы еще поговорим.

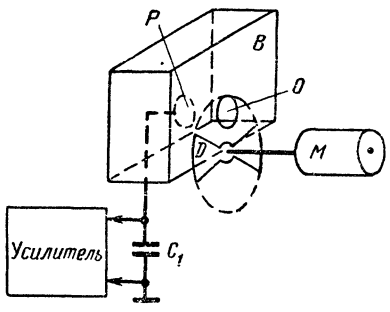


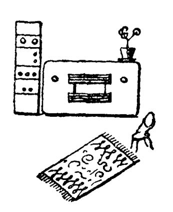
Рис. 10. В ящик B помещен металлический элемент P, расположенный перед отверстием O, открывающимся лишь в моменты, когда вращающийся диск D открывает его. Таким образом модулируется воздействие электрического поля на P.



Н. — В принципе это несколько напоминает мне метод, применяемый одним из моих друзей, работающим на циклотроне...

Л. — У него дома есть циклотрон???

Н. — Да нет, в Научно-исследовательском центре в г. Орсей. Там для измерения поля магнита используется небольшая катушка, помещенная на конце палки и вращаемая двигателем. Мой приятель замеряет наводимый в этой катушке ток.



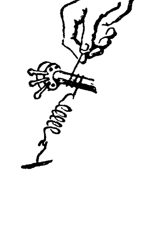
Л. — Действительно, это классическая система для измерения постоянных магнитных полей. Впрочем, можно поступить иначе. Как ты знаешь, сталь и ферриты (магнитные окислы же-

леза, имеющие структуру керамики) обладают одним свойством, которое обычно считается неприятным: они насыщаются в магнитном поле. Следовательно, достаточно поместить в магнитное поле стальной или ферритовый стержень; насыщение будет изменять магнитную проницаемость (стержень концентрирует магнитные силовые линии и повышает коэффициент самоиндукции катушки, в которую он введен). И теперь остается лишь определить эту проницаемость, для чего нужно просто измерить коэффициент самоиндукции катушки, надетой на стержень, и мы будем знать напряженность магнитного поля.

Н. — Но скажи мне, ведь если магнитное поле будет переменным, то это внесет порядочный хаос в твою систему с вращающейся катушкой или с переменным током, который ты несомненно используешь для измерения коэффициента самоиндукции?

Л. — Дорогой Незнайкин, ты просто ищешь трудности. При переменном магнитном поле катушку оставляют неподвижной и измеряют наведенное в ней напряжение.

Н. — Действительно, это проще. Итак, подведем итоги: ты говорил мне о датчиках постоянного напряжения (вибропреобразователях), о датчиках очень высокого напряжения (резистивных или емкостных делителях напряжения), о датчиках электрических или магнитных полей (вращающейся катушке или насыщающемся феррите). О чем же ты расскажешь мне теперь?



Механические датчики

Л. — Я полагаю, что было бы интересно поговорить о датчиках, чувствительных к механическим воздействиям.

Н. — Мне представляется, что силу можно измерить электрическим методом. Если изучаемую силу приложить к проволоке, на конце которой укреплена пружина, то в зависимости от величины силы пружина растянется больше или меньше. Если эту проволоку обернуть вокруг оси потенциометра, то с помощью электрических измерений можно определить, на сколько повернулась ось потенциометра.

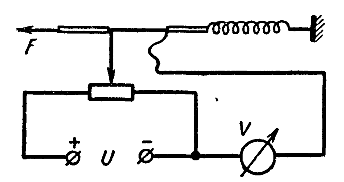


Рис. 11. В зависимости от величины приложенной силы F ползунок потенциометра больше или меньше перемещается влево, благодаря этому величину силы можно определить по показаниям вольтметра V.

Л. — Незнайкин, ты положительно находишься сейчас в прекрасной форме! Твою систему, правда в несколько измененном виде, часто используют: потенциометр заменен ползунком, скользящим по проволоке, имеющей высокое удельное сопротивление и намотанной на прямом стержне; при такой конструкции нет необходимости обматывать нить вокруг оси и ее привязывают непосредственно к ползунку. Источник постоянного напряжения (рис. 11) подключен к описанному переменному резистору, а вольтметр V, соединенный с одним выводом этого резистора и ползунком, позволяет определить место, занимаемое последним, а следовательно, и определить силу через соответствующее напряжение. Но существует и другой, получивший очень широкое распространение тип датчика силы: проволочный тензометрический датчик.



Н. — Название меня заинтриговало, но это должно быть дьявольски сложно!

Л. — Сложно лишь название. Видишь ли, Незнайкин, сопротивление проволоки изменяется, когда эту проволоку растягивают.

Н. — А! Теперь я понимаю, почему говорят: «Не тяните за выводы резисторов в приемнике»; ведь это изменило бы сопротивление резисторов и...

Л. — О! Причина совсем не в этом. Прежде всего, изменения сопротивления, о которых я говорил, составляют всего лишь несколько тысячных долей его первоначальной величины (максимум 0,5%); а кроме того, эти изменения происходят по известному закону и только у резисторов, сделанных из металлической проволоки. Совет, который тебе дали и который я считаю очень разумным, имеет целью предотвратить механическое повреждение используемых для монтажа аппаратуры резисторов. Посмотри, наши измерительные резисторы сделаны из очень тонкой проволоки, укрепленной в виде зигзага на кусочке бумаги (рис. 12). Это приспособление наклеивают на деталь (обычно металлическую), которая подвергается воздействию силы, вызывающей деформацию, приводящую к внутренним напряжениям. Если деталь подвергается растяжению, то участок, где наклеен измерительный резистор, удлиняется; это же происходит с резистором, и его сопротивление изменяется.

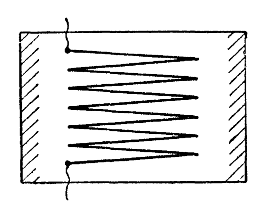
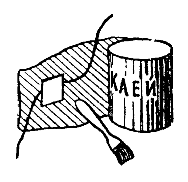


Рис. 12. Тензометрический датчик представляет собой проволоку с высоким электрическим сопротивлением, уложенную в виде зигзага и прикрепленную к листу бумаги.



Вопрос эластичности ...

Н. — Любознайкин, но это совсем не годится! Ты говоришь мне о металлической детали...

Л. — Необязательно, это только наиболее распространенный случай.

Н. — Если бы ты сказал мне о резине, я охотно допустил бы, что она деформируется под воздействием силы, но о металле этого сказать нельзя.

Л. — Первая новость! Посмотри на этот металлический стержень; он совершенно прямой, если его держать вертикально. А теперь я перевожу его в горизонтальное положение и один конец зажимаю в тисках; ты видишь, что стержень прогнулся. Теперь ты вынужден признать, что расположенные сверху волокна металла удлинились, а расположенные внизу — укоротились.

Н. — Тебе не следовало говорить мне этого! Теперь, проходя по мосту, я всегда буду думать, что детали его настила удлиняются под моим весом.

Л. — До тех пор, пока ты не заставишь их превысить предел эластичности, их удлинение остается строго пропорциональным вызывающей его силе, и опасаться совершенно нечего. Мост рассчитан на большие нагрузки. А кроме того, к счастью для нашего датчика, провод которого без риска обрыва может удлиниться не больше чем на долю процента, удлинение изучаемой детали очень мало.

Н. — Допускаю, но меня беспокоит другое: ты мне сказал, что изменение величины сопротивления не превышает 0,5%, а такое ничтожное изменение несомненно нельзя заметить на стрелке омметра.



Измерение малых изменений сопротивления

Л. — Разумеется, поэтому в этом случае пользуются не омметром. Измерения производят с помощью схемы, наводящей ужас на многих студентов последних курсов, ибо они не понимают простоты — моста Уитстона.

Рис. 13. Мост Уитстона состоит всего лишь из двух делителей напряжения. Напряжение между точками *A* и *B* равно нулю, когда мост сбалансирован $U_X = U_Q$.

Н. — О, опять этот ужас! Я никогда не понимал этого отвратительного сооружения: кошмарная история четырех уравнений с четырьмя неизвестными...

Л. — Мы поступим иначе. Посмотри на схему, изображенную на рис. 13. Что это такое?

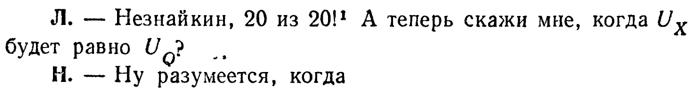
Н. — Здесь нет ничего таинственного: батарея и два делителя напряжения.

Л. — Хорошо, но можешь ли ты назвать величины напряжений U_X и U_Q?



Н. — Хм... давай посмотрим. Кажется, я догадался, если воспользоваться схемой, представленной на рис. 5, то получим:

$$U_X = \frac{X}{R_1 + X} U_{\text{вх}} \quad \text{и} \quad U_Q = \frac{Q}{R_2 + Q} U_{\text{вх}}.$$



Л. — Незнайкин, 20 из 20![1] А теперь скажи мне, когда U_X будет равно U_Q?

Н. — Ну разумеется, когда

$$\frac{X}{R_1 + X} U_{\text{вх}} = \frac{Q}{R_2 + Q} U_{\text{вх}}.$$

Л. — Хорошо, а теперь следи за мной. Деля обе части уравнения на $U_{\text{вх}}$, я получаю:

$$\frac{X}{R_1 + X} = \frac{Q}{R_2 + Q}.$$

В этой пропорции произведение крайних членов равно произведению средних членов, следовательно,

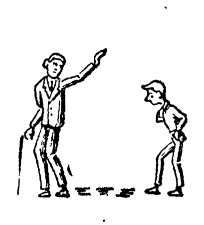
$$X(R_2 + Q) = Q(R_1 + X) \quad \text{или} \quad XR_2 + XQ = QR_1 + QX.$$

Из обеих частей уравнения я вычитаю величину XQ и в результате получаю:

$$XR_2 = QR_1$$

Н. — До сих пор я уследил за тобой...

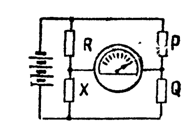
Л. — Вот и хорошо, а теперь остановись, расчеты закончены. Только что полученное выражение представляет собой условие равновесия (баланса) моста Уитстона, показывающее, что в нашей схеме (а она и есть мост Уитстона) $U_X = U_Q$. Это подтверждается тем, что чувствительный вольтметр, включенный между точками *A* и *B*, показывает нуль.



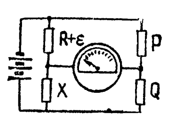
[1] В учебных заведениях Франции пользуются 20-бальной системой оценок (*Прим. перев.*).

Н. — Согласен, мост Уитстона — это очень просто. Но что он даст нам для наших тензометрических датчиков?

Л. — Представь себе, что R_2, Q и X постоянные резисторы, а R_1 — резистор, чувствительный к увеличению длины. Мы начнем с уравновешивания моста путем воздействия на резисторы R_2 и Q. Тогда включенный между точками A и B вольтметр покажет нуль. Если сопротивление резистора R_1 изменяется хотя бы и очень немного, напряжения U_X и U_Q перестанут быть равными и стрелка вольтметра отклонится и возможно до самого края шкалы, если прибор очень чувствительный.



Н. — Изумительный метод! И до чего практичен этот резистор R_1, чувствительный к механическому натяжению проволоки, из которой он сделан!





Влияние температуры

Л. — Это было бы слишком хорошо; резистор чувствителен к температуре по крайней мере в такой же степени, как и к воздействию силы. Но в этом случае мост Уитстона проявил себя еще лучше: в X вводится идентичный R_1, но не подвергающийся механическому напряжению резистор. Его размещают рядом

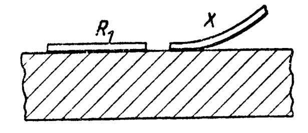


Рис. 14. Тензометрический датчик R_1 наклеен на исследуемую деталь и подвергается тем же, что деталь, деформациям. Резистор X приклеен только одним концом, поэтому он не подвергается воздействию силы, но находится в тех же температурных условиях, что и R_1; это позволяет скомпенсировать вредное влияние температуры на работающий датчик R_1.

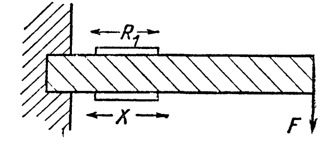
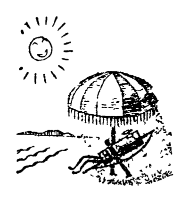


Рис. 15. При исследовании изгибающейся балки можно заставить компенсирующий тензометр X более активно участвовать в измерении: его наклеивают с другой стороны балки и он подвергается сжатию, а тензометр R_1 — растяжению.

с резистором R_1 (рис. 14), чтобы он находился при той же температуре, но приклеивают к детали только одним концом (чтобы он не испытывал воздействия механических усилий). Изменение температуры одинаково сказывается на R_1 и X и не нарушает равновесие моста; и только удлинение проволоки резистора R_1 может вывести мост из равновесия.

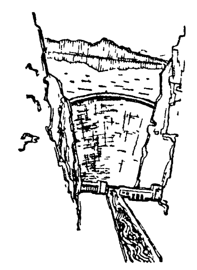
Н. — Чертовски хитрый метод! Но досадно, что резистор X служит лишь для компенсации.



Л. — Можно сделать еще лучше. В рассмотренном ранее примере с металлическим стержнем верх стержня растягивается, а низ сжимается. Если мы укрепим (рис. 15) тензометрические датчики R_1 и X один сверху, а другой снизу, то температурное воздействие, как и раньше, будет скомпенсировано (если только верх стержня не нагрет больше, чем его низ), но увеличение сопротивления R_1 (удлиняется) в сочетании с уменьшением сопротивления X (сжимается) повысит чувствительность прибора.

Можно было бы еще повысить чувствительность, если вместо резисторов R_2 и Q использовать тензометрические датчики и подвергнуть их воздействию растяжения и сжатия, наклеив их для этой цели в соответствующих местах исследуемой детали.

Вибрирующие струны



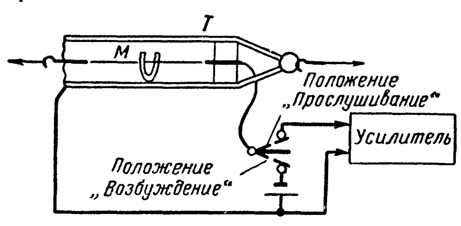
Н. — Но признайся, Любознайкин, наверное иногда при использовании твоих тензометрических датчиков приходится сталкиваться с определенными трудностями? Я имею в виду те случаи, когда измеряют механические напряжения (несомненно с помощью тензометрических датчиков) на больших плотинах, где измерительные приборы сосредоточивают в одном месте, относительно удаленном от точек, где нужно измерить напряжения. При большой длине проводов температурные воздействия и различные утечки исказят все результаты.

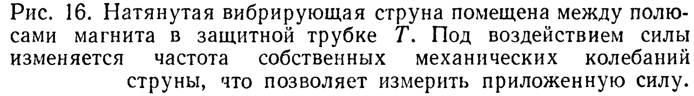
Л. — Рассуждаешь ты абсолютно правильно. В слишком неблагоприятных условиях используют другое свойство натянутой проволоки: изменение ее резонансной частоты при изменении силы натяжения.

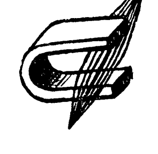
Н. — Каким образом? Делают колебательный контур из проволоки и конденсатора?

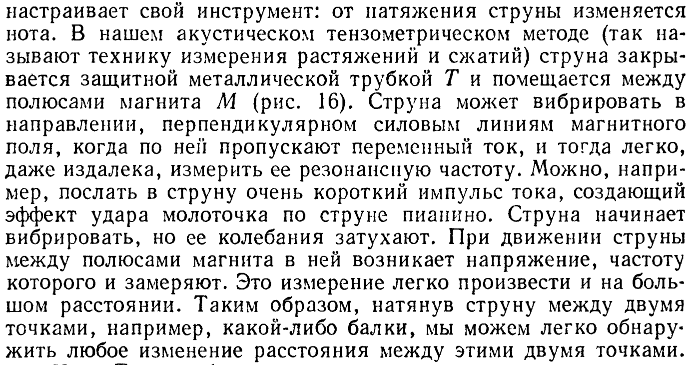
Л. — Ты не совсем угадал. Я говорю о механическом резонансе этой проволоки. Ты, конечно, видел и слышал, как скрипач





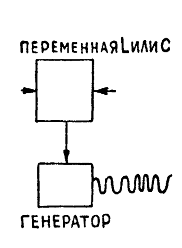

Рис. 16. Натянутая вибрирующая струна помещена между полюсами магнита в защитной трубке T. Под воздействием силы изменяется частота собственных механических колебаний струны, что позволяет измерить приложенную силу.




настраивает свой инструмент: от натяжения струны изменяется нота. В нашем акустическом тензометрическом методе (так называют технику измерения растяжений и сжатий) струна закрывается защитной металлической трубкой T и помещается между полюсами магнита M (рис. 16). Струна может вибрировать в направлении, перпендикулярном силовым линиям магнитного поля, когда по ней пропускают переменный ток, и тогда легко, даже издалека, измерить ее резонансную частоту. Можно, например, послать в струну очень короткий импульс тока, создающий эффект удара молоточка по струне пианино. Струна начинает вибрировать, но ее колебания затухают. При движении струны между полюсами магнита в ней возникает напряжение, частоту которого и замеряют. Это измерение легко произвести и на большом расстоянии. Таким образом, натянув струну между двумя точками, например, какой-либо балки, мы можем легко обнаружить любое изменение расстояния между этими двумя точками.

Н. — Таким образом мы располагаем еще одним датчиком для измерения силы. Я полагаю, что на этом серия датчиков закончилась?

Л. — Далеко не так. Попутно я назову тебе конденсатор, подвижная или деформируемая обкладка которого под воздействием приложенной силы может в большей или меньшей степени отходить от другой обкладки, изменяя тем самым емкость конденсатора. Можно также использовать изменение расстояния между двумя соединенными последовательно катушками: изменение коэффициента связи вызывает изменение самоиндукции всего устройства. Используя эти типы датчиков, можно сделать генератор, частота которого модулируется изменяемым элементом. Стоит также назвать пьезоэлектрические кристаллы, в которых при механическом воздействии возникает электрическое поле. Из кристаллического материала (керамика, кварц или специальная соль) вырезают по правильному направлению кристалла пластинку и металлизируют ее с обеих сторон; когда такой конденсатор подвергают механическим воздействиям, на его обкладках появляется напряжение.



Н. — Я думаю, что с присущим тебе юмором, ты сейчас объявишь мне, что все перечисленное тобой, от чего у меня уже начинает вспухать голова, всего лишь ничтожная часть перечня датчиков, чувствительных к механическим воздействиям.



Л. — Незнайкин, когда-нибудь ты должен стать пророком-ясновидцем. О механических датчиках можно было бы написать целые тома; но мне кажется, что ты начинаешь с беспокойством поглядывать на свои часы. Это несомненно связано с Полечькой и меня совершенно не удивляет.

Н. — Я вижу, что ты тоже большой мастер читать чужие мысли, и говорю тебе «до завтра».

■

Любознайкин открывает своему другу тайну, скрывающуюся под хорошо известным словом «ускорение», и рассказывает, как это ускорение измеряют. Речь пойдет также о датчиках, чувствительных к звуку, теплоте и, наконец, к свету (знаменитые фотоэлектрические элементы, с которыми так хотел познакомиться Незнайкин).

Датчики ускорения и фотоэлектрические элементы

Незнайкин — Надеюсь, что ты, Любознайкин, не займешь весь сегодняшний вечер разговорами о механических датчиках. Откровенно говоря, мне кажется вполне достаточно того, что я о них услышал.

Любознайкин — Успокойся. Прежде чем перейти к другой теме, я намерен рассказать тебе лишь о датчиках положения, т. е. о таких датчиках, которые позволяют превратить в электрический сигнал положение подвижного элемента.

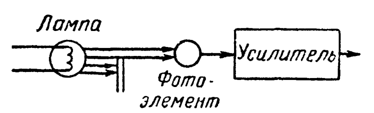
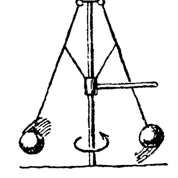


Рис. 17. В зависимости от положения подвижной заслонки меняется интенсивность лучей, доходящих от лампы до фотоэлемента.

Н. — Мне представляется, что многие приспособления, о которых ты говорил мне вчера, могли бы оказаться полезными для этой цели. Например, потенциометр с линейной намоткой катушки или же конденсатор переменной емкости.

Л. — Совершенно верно. Можно также использовать (рис. 17) пластинку, больше или меньше перекрывающую световой поток, оставшаяся часть которого измеряется фотоэлементом (этот прибор скоро станет предметом нашего разговора). Но перейдем к датчикам скорости; рассмотрим для начала способы измерения угловой скорости (или скорости вращения).



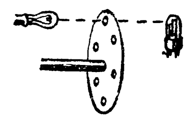
Измерение скорости

Н. — Здесь, должно быть, можно использовать регулятор с шарами, какой можно видеть на паровых машинах; ты прекрасно знаешь, что он представляет собой ось, на которой вращаются два шара, соединенные с нею рычагами: когда ось вращается быстро, центробежная сила разводит эти шары в стороны.



Л. — Да, это вполне реально. Но значительно проще соединить ось с маленькой динамомашиной (рис. 18); величина создаваемого ею напряжения пропорциональна скорости вращения, на таких приборах указывается, на сколько вольт увеличивается напряжение на один оборот в секунду оси динамомашины. Можно также соединить ось с валом маленького электрогенератора переменного тока и измерять частоту тока.

Н. — Все это очень хорошо, но динамомашина или генератор переменного тока, должно быть, тормозят движение оси?



Л. — Совершенно верно, но, если вал приводится в движение дизелем мощностью в 1 000 л. с., это не имеет большого значения. Однако в случае использования генератора переменного тока можно избежать какого бы то ни было торможения: на вращающемся валу крепится небольшой магнит; вращаясь поблизости от катушки, он наводит в ней электрический ток. Если ты не хочешь создавать никакого торможения, то можно также укрепить на валу диск с отверстиями, который n раз перекрывает луч света, попадающий на...

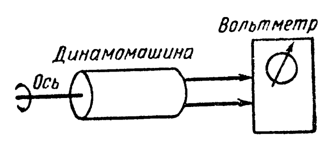
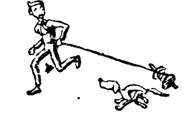


Рис. 18. Динамомашина вырабатывает напряжение, величина которого пропорциональна скорости вращения; измеряя напряжение, можно определить скорость вращения.

Н. — ...фотоэлектрический элемент! Я полагаю, что пока не изучу эти элементы, я не пойму электронику!

Л. — Да, они используются очень широко. Но сначала позволь мне рассказать тебе о датчиках скорости, используемых для измерения скорости прямолинейного движения.



Н. — О! В этом случае к движущемуся предмету привязывают нить и наматывают ее на барабан. Здесь, как в математике, «приводят к предыдущему случаю».

Л. — В предложенной тобой системе есть положительные качества. Можно также укрепить на подвижном предмете магнит, перемещающийся в катушке: наводимое в этой катушке напряжение будет функцией скорости перемещения.

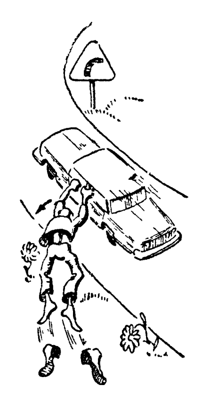
Прежде чем закончить этот раздел, я хотел сказать тебе несколько слов о датчиках ускорения или акселерометрах.

Ускорение

Н. — Постой. Ведь ускорение не что иное, как изменение скорости. Значит можно было бы ограничиться датчиком скорости и по его показаниям рассчитать ускорение.

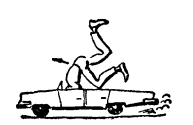
Л. — В какой-то мере ты прав. Но только отчасти; прежде всего ты руководствуешься классическим представлением, по которому ускорение представляет собой изменение лишь абсолютной величины скорости, а это справедливо только для прямолинейного движения. В этом конкретном случае действительно можно удовлетвориться датчиком скорости, передавая его показатели на дифференцирующую схему...

Н. — Ну, это совсем не то!..



Л. — Это намного проще, чем ты думаешь. Но ускорение имеет несколько иной, чем ты себе представляешь, смысл: ускорением называют всякое изменение скорости как по абсолютной величине, так и по направлению. Так, например, на поворотах у автомобиля, идущего с постоянной скоростью, возникает ускорение; ты чувствуешь это ускорение, потому что сила (именуемая центробежной) прижимает тебя к дверце машины точно так, как воздействует на тебя сила при изменении абсолютной величины скорости машины, идущей по прямой дороге.

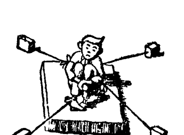
Н. — Ну, эти-то силы я хорошо знаю. У одного из моих приятелей есть спортивный автомобиль; когда он срывается с места, я едва удерживаюсь, чтобы не вылететь на заднее сидение,



а каждый раз, когда он тормозит, я рискую пробить своей головой ветровое стекло.

Л. — Познакомь меня со своим другом: если когда-нибудь он предложит мне поездку в машине, то я смогу сэкономить деньги на железнодорожном билете... А пока, представь себе, Незнайкин, что в машине своего друга ты сидишь на безукоризненно ровном и гладком сидении и что (для твоего же блага) привязан веревками к четырем датчикам силы...

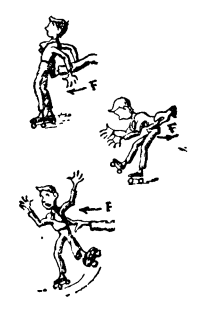
Н. — Это мне совсем не понравится...



Л. — Сейчас это не столь существенно. Главное в том, что, обладая определенной массой, твое тело будет иметь тенденцию сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения [1]...

Н. — Ах, Любознайкин! Ведь от природы я совсем не такой инертный!

Л. — Сейчас речь идет не о твоем характере, а о законе физики. Всякий обладающий массой предмет стремится оставаться неподвижным или сохранять постоянную по величине и направлению скорость (иначе говоря, равномерное прямолинейное движение). Для изменения твоей скорости к тебе нужно приложить силу в направлении движения (чтобы увеличить скорость), в обратном направлении (чтобы уменьшить скорость) или в направлении, перпендикулярном движению (чтобы изменить направление скорости). Однако, когда к тебе прикладывают силу, ты реагируешь с такой же, но противоположно направленной силой (здесь также проявляется не твой характер, а закон физики о действии и противодействии). Проявляемая тобою сила воздействует на датчики, а они показывают, какому усилию или усилиям подвергаешься ты в каждый момент...



Н. — Совершенно независимо от моего желания и воли...

Л. — Но тем не менее подвергаешься. Система, состоящая из автомобиля, тебя и датчиков силы, представляет собой акселерометр, который в каждый момент показывает ускорение автомобиля.

Экономичный акселерометр

Н. — Так значит для создания акселерометра требуется автомобиль, человек и...

Л. — Где твоя серьезность, Незнайкин? Ты несомненно прекрасно понимаешь, что для этой цели достаточно иметь (рис. 19)

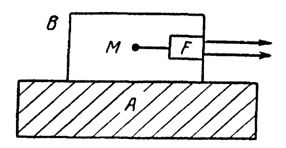


Рис. 19. Акселерометр представляет собой коробку B, прочно соединенную с подвижным предметом A. В этой коробке сила инерции массы M воздействует на датчик силы F, когда A испытывает ускорение.



соединенную с подвижным предметом A коробочку B, в которой предмет, обладающий массой M, соединен с датчиком силы F (на пьезоэлектрическом элементе, на потенциометрах или иной конструкции). Но обычно устанавливают несколько акселерометров, как правило три, чтобы обнаружить ускорения в трех направлениях: два в горизонтальной плоскости и одно в верти-

[1] Эту способность называют **и н е р ц и е й** тела (*Прим. ред.*)

альной (последнее не представляет интереса для автомобиля). автомобиле вертикальное ускорение возникает лишь при зде по рытвинам...

Н. — Нужно набраться терпения и постараться не думать морской болезни.

Л. — Незнайкин! Вместо того, чтобы заниматься шутками эмнительного вкуса, подумай о применении датчиков ускорения. ольшое количество таких приборов устанавливается в различ-ых частях ракет, уносящих в небо искусственные спутники. амолеты также богато оснащены ими; датчики устанавливают на различные подверженные вибрации детали машин, чтобы змерить вибрационные ускорения, столь опасные для оборудо-ания, где они возникают.

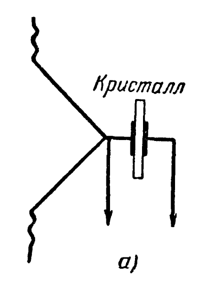
Н. — В самом деле это очень полезно.

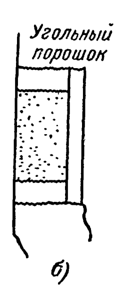
А теперь послушаем ...

Л. — Оставим на время механику и совершим небольшое утешествие в область акустических датчиков. Ты уже давно зна-ом с ними...

Н. — Да ведь это же микрофоны! Последний опыт, когда я ытался использовать микрофон в системе охраны от воров, акончился для меня полнейшим провалом.

Л. — Правильно. Известные тебе микрофоны можно рас-матривать как акустические датчики: они представляют собой





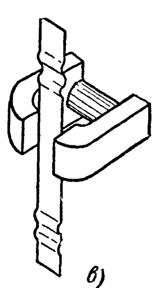
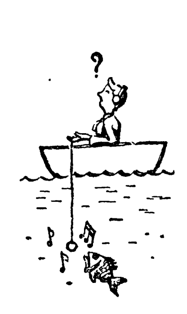


Рис. 20. В микрофонах может использоваться сжатие пьезо-лектрического кристалла (*а*) или угольного порошка (*б*); иногда спользуется также напряжение, наведенное в катушке или енте (*в*), перемещающейся в междуполюсном зазоре магнита.

рис. 20) мембрану, воздействующую на датчик силы (пьезоэлект-ический кристалл, угольный порошок, конденсатор) или на дат-ик скорости (подвижная катушка, лента). Но существуют и ругие акустические датчики: гидрофоны, предназначенные для осприятия звуков, распространяющихся в воде, и геофоны, редназначенные для прослушивания звуков, распространяю-щихся в земле.



Н. — Последние были бы очень полезны индейцам племени Сиу.

Л. — Клянусь супергетеродином, я не вижу никакой связи!

Н. — Любознайкин! Разве ты никогда не читал романов Май-а Рида или Фенимора Купера? Ведь всем известно, что главный ождь прикладывает ухо к земле, чтобы услышать стук копыт ошадей своих врагов или кареты, на которую индейцы соби-аются напасть.



Л. — Прости меня, да будет мне позволено немного забыть этих классиков, чтобы... вернуться в Европу. Геофоны, в частности, используют для прослушивания звуков взрыва, чтобы узнать, где расположены подземные слои, отражающие звук взрыва заряда тринитротолуола. Этот способ широко используется геологами при поисках нефти.



Но история с индейцами племени Сиу настолько подогрела мое воображение, что мне представляется логичным перейти к датчикам, чувствительным к температуре.

Чем можно заменить термометры

Н. — Нашел! Прошлый раз ты мне говорил, что резисторы тензометрических датчиков чувствительны к температуре. Достаточно один такой датчик подвергнуть воздействию не механических напряжений, а температуры и дело в шляпе!

Л. — Совершенно справедливо, так и делают. Однако в качестве чувствительного к температуре элемента используют не тензометрический датчик, в котором все сделано для снижения его чувствительности к температуре, а обычный резистор. Можно сказать, что в среднем при обычной температуре сопротивление металлической проволоки увеличивается на 1% при возрастании температуры на каждые 3° С.

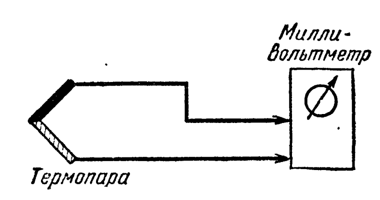
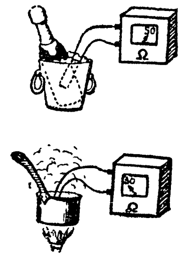


Рис. 21. Термопара состоит из двух спаянных кусочков разных металлов. При нагревании места спая на выводах термопары появляется напряжение, повышающееся при увеличении температуры.

Н. — Я думаю, что в этом случае предпочтение отдается наиболее чувствительным к температуре резисторам, которые, как я слышал, называются терморезисторами?

Л. — О, не всегда! Терморезисторы (о них я еще буду говорить) представляют собой полупроводниковые приборы, сопротивление которых при небольших токах (не вызывающих заметного нагревания) уменьшается при повышении температуры. Впрочем, изменение сопротивления терморезисторов происходит значительно быстрее, чем у классических резисторов; изменение может достигать 4% на 1° С, т. е. в 12 раз больше, чем у металлов. Поэтому эти приборы называют терморезисторами или элементами с отрицательным ТКС (что означает температурный коэффициент сопротивления)[1].



Н. — Но если терморезисторы в 12 раз чувствительнее к температуре, чем металлические резисторы, то я полагаю, что последними для измерений температуры никогда не пользуются.

Л. — Ты не прав. Классические резисторы используются очень широко, так как они выдерживают температуры, которые выводят терморезисторы из строя. А кроме того, зависимость сопротивления резисторов от температуры очень простая, почти линейная, тогда как сопротивление терморезисторов подчиняется относительно сложной закономерности. Резистор из платины мо-

[1] Слово «отрицательный» указывает на уменьшение сопротивления при возрастании температуры (*Прим. ред.*).

:ет использоваться для измерения температуры от нескольких радусов выше абсолютного нуля (около —260° С) до 1 500° С. Іо имеются также термоэлектрические пары, прочно соединенные два металла (или полупроводниковых материала), контакт ежду которыми при нагревании превращается в настоящую батаею (рис. 21).

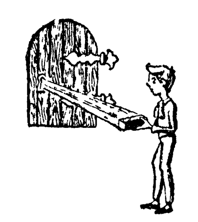


Н. — Чудесно! Значит, достаточно подогреть такие пáры еталлов и получай электричество. Так это же прекрасное будуцее для электростанций!

Л. — Конечно. В частности, в СССР, где много занимались гой проблемой, получают электроэнергию для транзисторного адиоприемника от батареи термопар, расположенной вокруг гекла керосиновой лампы, используемой для освещения.

Излучение

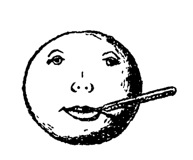
Н. — А как измеряют высокие температуры, например выше 000° С?



Л. — Как ты знаешь, все сильно нагретые тела испускают вет — это форма излучения энергии. Ученые установили, что ри не очень высоких температурах полная мощность, излучаеая одним квадратным сантиметром поверхности нагретого тела, римерно пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры T нагретого тела (т. е. его температуры выше абсолютого нуля, который соответствует — 273° С) [1]. Измерив излучаеую мощность, можно узнать температуру. Этот метод испольуется для измерения даже очень высоких температур. Но в этих лучаях прибегают к слишком смелой экстраполяции законов злучения энергии, а справедливость этих законов для очень ысоких температур опровергнута успешным проведением термодерных взрывов: по этим законам водородная бомба не может зорваться.

Н. — Лично я предпочел бы, чтобы эти законы оказались равильными!!!

Л. — Я тоже, но опыт показал, что бомба взрывается. Слеовательно, эти экстраполяции несколько фантастические. Погому, когда мне говорят, что температура такой-то звезды равна миллионам градусов, то я воспринимаю это примерно так же, ак если бы мне сказали: «Ее температура 3 тонны или 10 миут».



Н. — Значит, измерения излучения ровным счетом ничего е стоят?

Л. — Не совсем так. Например, термопары позволили измеить температуру в различных точках Луны и некоторых планет; ля этого пришлось полученное с помощью телескопа изображеие небесного тела или части небесного тела зеркалом направить на термопару, нагрев которой изменяется в зависимости г температуры наблюдаемого в телескоп тела. Эти измерения али прекрасные результаты.

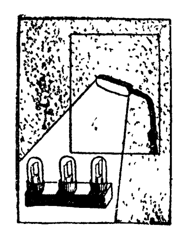
Н. — Охотно признаю, но мне хотелось бы, чтобы ты, накоэц, рассказал мне о фотоэлементах.



Л. — Я как раз и подхожу к этому вопросу. Но помнишь і ты, каким образом вырывают электроны из катода электронэй лампы?

Н. — Конечно. Для этого повышают температуру тела, что зеличивает подвижность молекул; движущиеся молекулы так

[1] Закон Стефана — Больцмана (*Прим. ред.*).



толкают электроны, что в конечном счете они вылетают из веще ства.

Л. — Примерно так. Для большей точности я добавлю, чт вызываемое повышением температуры увеличение энергии элект ронов позволяет им прорваться через поверхностный слой. Та вот, Незнайкин, энергию электронов можно также увеличить облучив светом вещество, в котором они находятся...

Н. — Великолепно! Но тогда нагреваемые катоды в электрон ных лампах можно заменить освещаемыми катодами?

Фотоэлементы

Л. — Твое предложение большой практической ценности н представляет, так как получаемый таким образом ток весьм мал. Чтобы сделать фотоэлемент (рис. 22), нужно взять пластинку покрытую веществом, способным под воздействием света испус кать электроны, и поместить ее і колбу, из которой откачан воздух В этой же колбе размещается ещ одна пластинка, имеющая положи тельный потенциал относительн первой, называемой катодом. Элек троны, испускаемые катодом по воздействием падающего на нег света, пойдут к другому электрод (аноду), в результате чего в цепі появляется ток, величина которог зависит от освещенности катода.

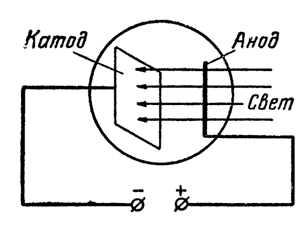
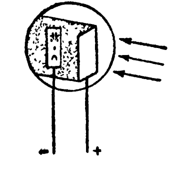


Рис. 22. Фотоэлектрический элемент. Под воздействием света катод испускает электроны, а анод эти электроны собирает.

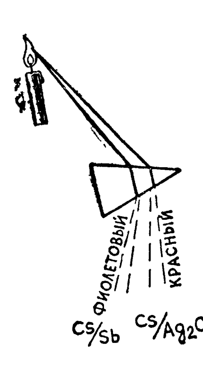
Н. — Как я вижу, фотоэлемен не так уж сложен. Это прост диод, у которого катод не нагрет а освещен. Но скажи мне, пожа луйста, почему ты нарисовал анод таким маленьким, как кусочек тонкой проволоки? Его следовало бы сделать значительно больше.



Л. — В этом нет необходимости и, кроме того, не забывай что анод должен пропускать весь свет и не должен отбрасыват на катод тень. А кроме того, для небольшого анодного тока I_a (который редко достигает десятка микроампер и часто составляет всего лишь доли микроампера) большой анод не нужен.

Н. — До чего же маленькие токи в фотоэлементе. А кроме того, наверно, очень неудобно размещать анод на пути свето вого потока!

Л. — Как ты увидишь, мы очень легко приспосабливаемся к этим маленьким токам. Что же касается размещения анода, то можно сделать катод полупрозрачным и нанести его фото слой на внутреннюю стенку колбы: лучи света будут падать на фотослой катода с одной стороны (внешней), а электроны вылетать с другой стороны (внутренней), и тогда отпадает необ ходимость располагать анод со стороны источника света. И уж, если мы начали говорить о катоде, позволь мне сказать, что имеется большое количество различных катодов. Катоды из цезия, нанесенного на слой сурьмы, чувствительны к синим и фиолетовым лучам; катоды из цезия, нанесенного на окись серебра, чувствительны в основном к красным и инфракрасным лучам. И наконец, запомни, что анодный ток I_a почти не зависит от анодного напряжения — он зависит только от освещенности катода (эта зависимость почти прямо пропорциональна, что позволяет установить чувствительность фотоэлемента в мик-

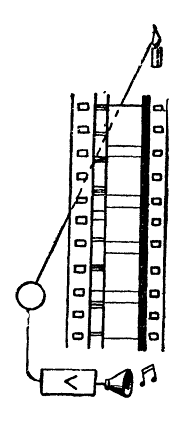


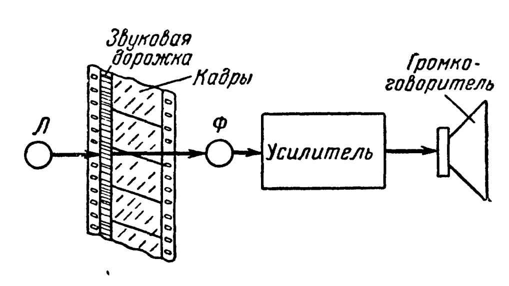
мперах на люмен [1]). В принципе вакуумный фотоэлемент ет себя примерно так же, как диод в режиме насыщения, ток ыщения которого зависит только от температуры нити накала.

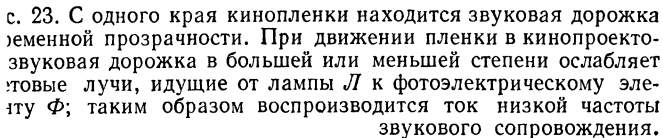
Н. — Ты говоришь вакуумные фотоэлементы? Значит бы- ɪт и другие?

Л. — К сожалению, да. Например, газонаполненные фото- менты, которые практически идентичны описанным выше, но ичаются от них тем, что в них вводят небольшое количество а, ионизирующегося под воздействием исходящих с катода ктронов. Ионизация газа увеличивает фотоэлектрический ток есколько раз (может доходить до 4) и ...

Н. — Так ведь это просто здорово, если первоначальный ток мал. Почему же ты сказал «к сожалению»?

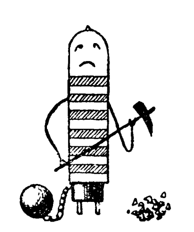






с. 23. С одного края кинопленки находится звуковая дорожка еменной прозрачности. При движении пленки в кинопроекто- звуковая дорожка в большей или меньшей степени ослабляет товые лучи, идущие от лампы *Л* к фотоэлектрическому эле- нту *Ф*; таким образом воспроизводится ток низкой частоты звукового сопровождения.

Л. — Потому что эти фотоэлементы годятся лишь для вос- оизводящей головки звукового кинопроектора. Ты, вероятно, аешь, что в звуковом кино звук чаще всего записывается в де «звуковой дорожки» — узкой полоски переменной прозрач- сти, идущей по краю кинопленки. При демонстрации фильма дорожка проходит между лампой *Л* (рис. 23) и фотоэлемен- м *Ф*. Промодулированный дорожкой свет попадает на фотоэле- нт, который и преобразует его в электрические сигналы; по- едние поступают на усилитель. На протяжении многих лет онаполненные фотоэлементы вытесняли все другие. Однако и очень недолговечны; их чувствительность изменяется во вре- ни и зависит от температуры, а из-за запаздывания ионизации и деионизации они не могут правильно воспроизводить очень стрые изменения света (уже на частоте 10 *кгц* они создают гери 3 *дб*)...



Н. — Достаточно, не выдвигай других обвинений. Для меня онаполненные фотоэлементы осуждены окончательно и без ава обжалования приговора. И сожалею только о том, что, оме вакуумных фотоэлементов, нет никаких других приборов, вствительных к свету.

---

[1] Люмен (*лм*) — единица измерения светового потока, посы- емого источником с силой света, равной 1 международной свече *св*), внутрь единичного телесного угла (один стерадиан —1 *стер*) *рим. ред.*).

Светочувствительные приборы

Л. — Твои сожаления совершенно излишни. Уже сущест вует великое множество светочувствительных приборов. В пер вую очередь следует назвать фоторезисторы; некоторые веще- ства, в частности сульфид свинца, сульфид кадмия, а такж селениды и антимониды, после соответствующей обработки обла дают определенным электрическим сопротивлением, изменяю щимся в зависимости от освещения. Но из этих веществ не всегд можно сделать настоящие резисторы; некоторые из них представ ляют собой полупроводники (протекающий по ним ток не пропор ционален приложенному напряжению). Кроме того, они могу отличаться большой инерционностью (несколько десятых долей секунды). Поэтому фоторезисторы мало пригодны для измерения све та, но прекрасно служат, когд нужно включить реле (рис. 24).



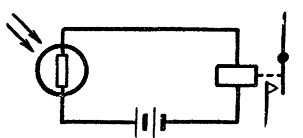


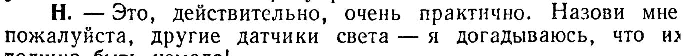
Рис. 24. При освещении фоторезистора его сопротивление снижается, и проходящий по нему ток может без дополнительного усиления включить реле.

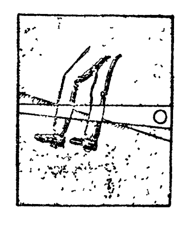
Н. — Я думаю, что это как ра то, чего мне не хватало для моей системы охраны ювелирного мага зина от воров.

Л. — Совершенно верно, осо бенно, если учесть, что фоторези сторы достаточно чувствительны к инфракрасным лучам.

Н. — Опять эти инфракрасные лучи! Что это такое и как их по- лучают?

Л. — Здесь нет ничего таин ственного. Инфракрасные лучи не что иное, как свет, располагающийся в спектре немного дальше красных лучей в сторону более низких частот (более длинных волн). Наш глаз не может их увидеть, но некоторые фотоэле менты чувствительны к ним так же, как к видимому свету. Для получения инфракрасных лучей используют простую лампу накаливания и фильтр, задерживающий все видимые световые лучи и пропускающий только инфракрасные. Таким образом ты можешь получить луч невидимого света, который можно обнару жить вакуумным фотоэлементом с катодом, чувствительным к инфракрасным лучам; такой катод состоит из слоя цезия, нане сенного на пластинку из окиси серебра. Обычно фирмы, выпу скающие фотоэлементы, называют эти катоды «катодами S_1». Ты можешь также использовать фоторезистор, и никто не сможет увидеть твоей системы предупреждения.





Н. — Это, действительно, очень практично. Назови мне пожалуйста, другие датчики света — я догадываюсь, что их должно быть немало!

Фотодиоды

Л. — О, да! Действительно имеется очень большое количе ство других. Но я назову тебе лишь фотодиоды (рис. 25). Это плоскостной диод из германия или кремния, имеющий зону *n* и зону *p*. Если зону *p* сделать положительной относительно зоны *n*, то ток свободно пройдет. А если подать обратное смеще ние, то ток не пройдет...

Н. — Как и в любом диоде из порядочной семьи!

Л. — Да, но этот диод «из порядочной семьи» набирается дурных идей, когда на его переход попадает свет: удары фото

нов (частичек света) порождают на переходе па́ры «электрон — дырка», и диод ведет себя так, как если бы появился «ток утечки», впрочем, мало зависящий от напряжения.

Н. — Диод меня побери! Ты объяснил мне одно явление, которого я никак не мог понять: однажды я сделал универсальный измерительный прибор с гальванометром и четырьмя плоскостными германиевыми диодами и заметил, что при измерении переменных напряжений мое сооружение утром работает плохо, а во второй половине дня намного лучше. Окна моей лаборатории обращены на восток, и утром солнце сильно освещало диоды.

Л. — Это может служить объяснением. Но возможно также, что причина заключается в нагревании твоих диодов. Их предохраняют от воздействия света, покрывая черной краской.

Н. — Да, сначала краска была, но я ее соскоблил, чтобы посмотреть, что находится внутри.

Л. — Весьма поучительная история — любопытство всегда наказывается. Фотодиод интересен тем, что он часто в 300 раз более чувствителен, чем лучший из вакуумных фотоэлементов. А кроме того, он отличается малой инерционностью и легко воспроизводит изменения света со скоростью до 100 000 периодов в 1 *сек*. Основной его недостаток, общий для всех полупроводниковых приборов, — чувствительность к повышению температуры.

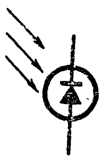


Рис. 25. Так обозначается на схемах фотодиод

Н. — В 300 раз чувствительнее лучших вакуумных фотоэлементов! Да это просто чудо! Фотодиоды можно использовать только в сумерках!

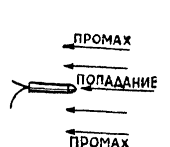
Л. — Ты серьезно ошибаешься. Чувствительная поверхность фотодиодов очень маленькая, и требуется хорошее освещение, чтобы на эту крошечную поверхность попал поток в несколько люменов, необходимый для получения достаточного тока. Тем не менее это очень полезные приборы, и они несомненно заменят газовые фотоэлементы в воспроизводящих головках звуковых кинопроекторов.

Н. — Прекрасно!

Л. — Я тоже не надену траура. Однако существует и другое средство для чрезвычайно большого повышения чувствительности фотоэлементов.

Н. — Усиление?

Л. — Совершенно верно. Но сейчас я думаю не о том методе усиления, который ты знаешь, а о методе, основанном на использовании вторичной электронной эмиссии.

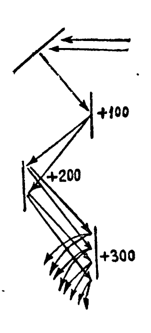


Фотоумножители

Н. — Что это еще за пугало? А, вспомнил. Это явление доставляло нам столько неприятностей в тетродах: ускоренные экранной сеткой электроны при попадании на анод выбивают из него новые электроны. В некоторых случаях, когда потенциал сетки выше потенциала анода, экранная сетка улавливает эти электроны, что порождает определенный ток, протекающий от анода к экрану, и анод становится вторичным катодом.

Л. — Двадцать из двадцати, дорогой Незнайкин! Для использования этого явления в фотоэлементах делают так, что электроны, исходящие с освещенного катода (его потенциал равен 0), попадают на первый электрод (с потенциалом +100 *в*). Этот электрод покрыт веществом, обладающим бо́льшой вторич-





ной эмиссией, а расположен он рядом с другим электродом с потенциалом +200 *в*. На каждый электрон, вылетевший с фотокатода и попавший на электрод с потенциалом +100 *в*, с этого электрода вырывается 2 или 3 электрона, которые летят на электрод с потенциалом +200 *в*. Рядом с последним находится еще один электрод с потенциалом +300 *в*, он получает уже 4 или 9 электронов (рис. 26).

Н. — Все это очень хорошо, но скажи, пожалуйста, Любознайкин, что мешает исходящим с фотокатода электронам отправиться прямо на электрод с потенциалом +200 *в*, а еще лучше на электрод с потенциалом +300 *в*?

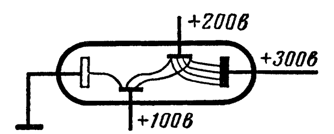


Рис. 26. В фотоумножителе испускаемые катодом электроны вызывают вторичную эмиссию на первом диноде, который посылает электроны на другой динод, имеющий более высокий потенциал. Этот второй динод еще раз умножает количество электронов и направляет их на анод.

Л. — Этому препятствует само взаимное расположение электродов, создающее электрические поля соответствующей формы. Но тем не менее всегда находится несколько электронов с «дурной головой», которые идут туда, куда им ходить не следовало бы. Главное в том, что, говоря языком статистики, они немногочисленны. Создав фотоумножитель с десятком каскадов умножения, можно достичь усиления фотоэлектрического тока в несколько миллионов раз. Чувствительность таких фотоумножителей бывает просто фантастической. Впрочем, эти электровакуумные приборы широко используются для измерений в промышленности, в астрономии... Я принес с собой один такой прибор, чтобы показать его тебе.



Н. — О! А я-то ожидал увидеть колоссальное сооружение, особенно когда узнал, что в нем 11 фотоумножающих каскадов. Кстати, как называются эти электроды, которые одновременно являются анодами (для предшествующей части) и катодами (для последующей части)?

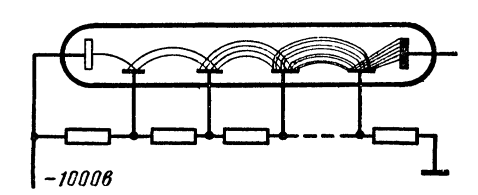
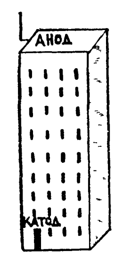


Рис. 27. Для питания многокаскадного фотоумножителя лучше подавать смещение на диноды с помощью цепочки резисторов, включенной между катодом (с высоким отрицательным потенциалом) и корпусом.



Л. — Они называются вторично-электронными катодами или динодами. Соответствующие потенциалы подаются на них с помощью цепочки резисторов или последовательно включенных маленьких неоновых лампочек, обладающих еще одним преимуществом, а именно, — способностью стабилизировать напряжение. Тем не менее я предпочитаю (рис. 27) цепочку из резисторов, которая позволяет получить одинаковую разницу потенциалов

между соседними динодами. Действительно, чувствительность всего устройства (а, вернее, кратность умножения каскадов) очень сильно зависит от разности напряжения между двумя соседними динодами.

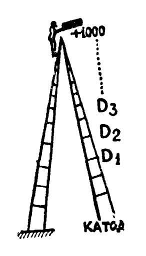


Н. — Понятно. Но почему на своей схеме ты подал на катод отрицательное напряжение?

Л. — Я предпочел подать на катод — 1 000 *в* относительно корпуса и таким образом иметь потенциал последнего электрода (анода) близким к нулю, потому что именно с этого электрода я буду снимать усиленный фотоэлектрический ток.

Н. — Но скажи, пожалуйста, зачем все-таки нужен фотоэлемент с такой чудовищной чувствительностью?

Л. — Весьма часто приходится иметь дело с очень слабым лучом света. Наиболее типичным случаем является использование фотоумножителей в сцинтилляционных счетчиках, предназначенных для обнаружения ядерного излучения [1].

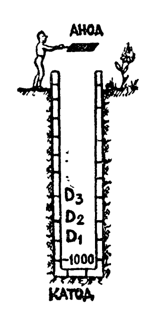


Н. — Ты хочешь сказать атомных лучей?

Л. — В известном смысле, да, но мне абсолютно не нравится это выражение, порожденное авторами низкопробного фантастического чтива. Во всех явлениях, которые неверно называются «атомными», на самом деле происходят изменения ядра.

Н. — Я понял, к чему ты ведешь. Вырывание электронов с катода электронной лампы или из ионизированного газа затрагивает атомы и поэтому могло бы заслуживать название «атомного явления».

Л. — Совершенно верно. А кроме того, ты забыл о химических реакциях, когда различные атомы обмениваются между собой электронами Тогда как при распаде радия изменение претерпевают ядра атомов; такие же явления происходят в металле атомных бомб (которые следовало бы назвать «ядерными бомбами») или в атомах материала, используемого в реакторах для производства плутония.



Н. — Все эти истории с радиоактивностью представляются мне довольно туманными. И раз ты начал мне говорить об этом, то я могу сделать вывод, что нам предстоит сменить класс рассматриваемых датчиков, но часы показывают очень поздний час, и я думаю, что сегодня я не способен больше что-либо воспринять. Если ты не возражаешь, мы продолжим нашу беседу завтра.

Л. — Согласен, и мы сможем завершить вопрос о датчиках. Он, несомненно, немного скучен, но имеет очень большое значение в электронике.

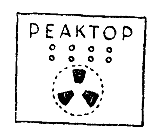
---

[1] Сцинтилляции — отдельные вспышки света (*Прим. ред.*).

2*

Беседа четвертая

Проникнув в глубь вещества, Любознайкин посвящает своего друга в тайны протонов, нейтронов и других элементарных частиц, а также в тайны ядерных излучений. Сразу же после этого он переходит к датчикам, чувствительным к этим излучениям (счетчики Гейгера, ионизационные камеры, сцинтилляционные счетчики); начав разговор о частицах, наши друзья добрались и до процессов, происходящих с ионами в растворах. Незнайкин узнает, что такое pH, *характеризующее кислотность раствора, его окисляющие свойства, а также какими датчиками можно измерить это число.*

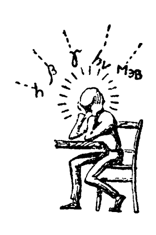


Измерения в химии и ядерной физике



Незнайкин — Дорогой Любознайкин, я совершенно обескуражен. Я попытался прочитать статью о «ядерных явлениях» (как ты их называешь) и был буквально подавлен лавиной таких незнакомых терминов, как бета-лучи, нейтроны, изотопы, электронвольты, бетатрон...

Любознайкин — Я не стану объяснять значения всех этих терминов, но ты сам увидишь, что все это не так ужасно, как тебе кажется. Прежде всего я попрошу тебя напомнить мне, как устроены ядра атомов.



Строение атома

Н. — Это маленькие шарики, заряженные положительно и содержащие в себе почти всю массу атома

Л. — Правильно, но об атомных ядрах известно намного больше. Они состоят из частиц двух типов: п р о т о н о в — мельчайших зернышек с положительным зарядом, и н е й т р о н о в — мельчайших зернышек с такой же массой, но не имеющих электрического заряда. Заряд протона равен заряду электрона, но имеет противоположный знак. Само собой разумеется, что в ядре нейтрального атома имеется столько же протонов, сколько электронов вращается вокруг этого ядра. Количество протонов называется «атомным номером». Например, наиболее простое по своему устройству ядро водорода состоит всего лишь из одного протона, вокруг которого вращается один электрон. Следовательно, атомный номер водорода 1. Но существует также и другой водород, именуемый тяжелым водородом (или дейтерием). В при-

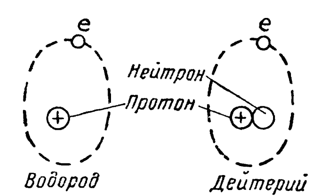
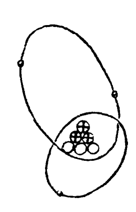
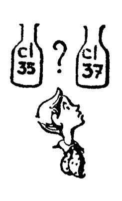


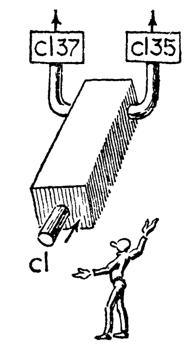
Рис. 28. Ядро простого водорода состоит только из одного протона. В ядре тяжелого изотопа водорода «дейтерия» кроме протона имеется еще один нейтрон. У атомов обоих типов водорода вокруг ядра вращается только один электрон.



роде он существует в виде очень небольшой примеси к простому водороду (на 1 000 атомов простого водорода не более 1 атома тяжелого). Ядро этого тяжелого водорода состоит из одного протона и одного нейтрона (рис. 28). Каждый такой атом, как и атом простого водорода, имеет только один электрон. Дейтерий имеет более высокую плотность, чем легкий водород, но обладает почти идентичными химическими свойствами. В периодической таблице элементов Менделеева легкий водород и дейтерий располагаются вместе; и именно поэтому дейтерий и легкий водород называют изотопами от греческих слов «изос» (тот же) и «топос» (место).



Существуют и другие атомы, ядра которых содержат одинаковое количество протонов (имеют один и тот же атомный номер), но могут существовать в двух формах. Эти формы отличаются одна от другой по количеству нейтронов, объединенных с протонами в ядре. Например, хлор с атомным номером 17 (17 протонов в ядре и 17 электронов вокруг ядра) имеет два типа атомов: у одних ядро состоит из 17 протонов и 18 нейтронов (общее число частиц в ядре 35), а у других ядро состоит из 17 протонов и 20 нейтронов (общее число частиц в ядре 37). Эти два типа хлора строго идентичные с точки зрения химии и являются изотопами.



Смесь изотопов

Н. — А из каких атомов состоит газ, который называют «хлором», с 18 или с 20 нейтронами?

Л. — Он содержит примерно $^3/_4$ атомов хлора с 18 нейтронами и $^1/_4$ атомов хлора с 20 нейтронами.

Н. — Изменяется ли это соотношение в зависимости от происхождения хлора?

Л. — Нет. Это одно из наиболее любопытных известных явлений природы; соотношение двух изотопов строго одинаково как в хлоре, добытом из соли Индийского океана, так и в хлоре калиевой соли, добываемой в шахтах Эльзаса.

Н. — Можно ли разделить эти изотопы?

Л. — Да, можно, но чрезвычайно трудно. В таком разделении изотопов заключается значительная часть работы современных ядерных производств: разделение природного урана на изотоп 235 (92 протона и 143 нейтрона) и изотоп 238 (92 протона и 146 нейтронов). Изотоп 235 единственный радиоактивный изотоп урана, т. е. такой, ядра которого распадаются самопроизвольно. В природном уране его содержится всего лишь 0,7%. В принципе, Незнайкин, большинство веществ, которые называют «простыми», на самом деле состоят из смеси изотопов, но их так трудно разделить, что лишь в начале XX века установили, что они представляют собой смесь. Прими во внимание, что с точки зрения химии эти изотопы строго идентичны, и ты поймешь, почему их так недавно открыли.



Мир частиц

Н. — Теперь я достаточно хорошо понимаю, что такое изотопы. Но я хотел бы также узнать, что представляют собой бета-частицы и другие...



Л. — Именно об этом я и хочу рассказать. Так называемые радиоактивные вещества отличаются определенной неустойчивостью: их ядра самопроизвольно распадаются, и мелкие кусочки ядра разлетаются во все стороны. Такими осколками ядер могут

быть нейтроны (испускание нейтронов), иногда электроны (тогда говорят, что мы имеем дело с бета-лучами или β) [1]. Случается также, что из ядра вылетают группы, состоящие из четырех частиц: двух нейтронов и двух протонов. Эти группы называют альфа-частицами α или «гелионами», а поток этих частиц называют альфа-лучами [2].

Ядерные явления сопровождаются также гамма-излучением (γ), которое аналогично свету (или, вернее, рентгеновским лучам) и проявляет волновые свойства.

Н. — Как я вижу, это излучение совсем не похоже на другие; это своего рода свет, а не поток частиц.

Л. — О! Знаешь, между излучением частиц и излучением светового типа разница не столь уж велика. Они различаются между собою скорее всего проникающей способностью.

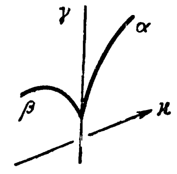


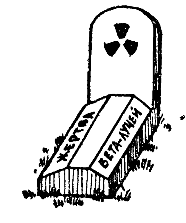
Рис. 29. Магнитное поле *H* не отклоняет гамма-лучи, немного отклоняет альфа-лучи и сильно отклоняет (в противоположную сторону) бета-лучи.

Альфа-лучи далеко не уходят — их путь в воздухе всего несколько миллиметров. Бета-лучи способны уйти дальше и пройти сквозь лист алюминия и даже через тонкий стальной лист (чем меньше плотность вещества, тем легче проходит через него ядерное излучение). Гамма-лучи обладают высокой проникающей способностью. Все эти три вида излучения обладают ионизирующими свойствами, т. е. они способны вызвать ионизацию газа. При прохождении через газ они могут разделить молекулы газа на ненейтральные с точки зрения электричества части (ионы) и сделать газ проводником. Они могут также вызвать конденсацию паров воды, когда последние охлаждены ниже температуры, в которой (при данной концентрации) должна происходить конденсация. Пар может находиться в этом неустойчивом состоянии перенасыщения...

Н. — ... как вода, которую удается охладить на несколько градусов ниже нуля без превращения в лед

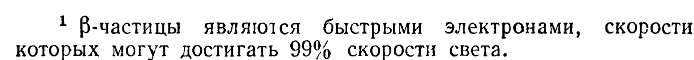
Л. — Прекрасное сравнение. Такой пар может быстро превратиться в воду, если через него пройдут ядерные α-, β- или γ-лучи, что можно наблюдать по образованному мелкими капельками воды следу.

Н. — Если я правильно понял, α-, β- и γ-лучи можно различить по их проникающей способности?



Л. — Да, этой идеей можно воспользоваться, но обычно предпочитают пропускать излучение через магнитное поле: альфа-лучи (очень тяжелые положительно заряженные частицы) несколько отклоняются в одну сторону; бета-лучи (очень легкие частицы с отрицательным зарядом) сильно отклоняются в другую сторону, а гамма-лучи вообще не отклоняются (рис. 29). Нейтроны тоже не отклоняются магнитным полем. Пучок нейтронов не обладает также ионизирующим свойством и не конденсирует паров воды; его обнаруживают косвенными методами.

Н. — А могут ли эти лучи, наподобие рентгеновских, пронизать человеческое тело?

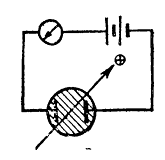


[1] β-частицы являются быстрыми электронами, скорости которых могут достигать 99% скорости света.

[2] α-частицы являются ядрами гелия, движущимися со скоростями порядка (10^4—$2 \cdot 10^4$) *км/сек* (*Прим. ред.*).

Л. — Да, за исключением α-лучей. Как и рентгеновские лучи, они в больших дозах чрезвычайно вредны для человека и живых существ, поэтому очень важно уметь их обнаруживать.

Измерение излучения



Н. — Ты, вероятно, используешь для этой цели конденсацию водяных паров, находящихся в состоянии «отсроченной конденсации»?

Л. — Такой пар называют «перенасыщенным». Его действительно можно использовать, и именно таким образом изучали радиоактивность лет тридцать назад. Камеру, содержащую пар, называют «камерой Вильсона». Но нам лучше было бы воспользоваться свойством ядерных излучений делать газ проводником

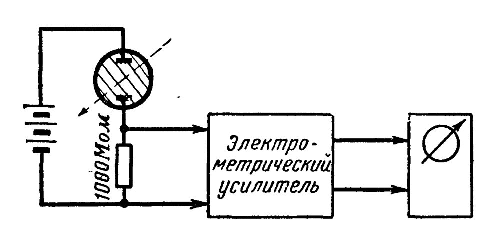
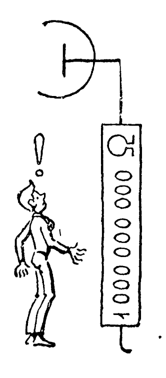


Рис. 30. Ядерные частицы, проходя через ионизационную камеру, ионизируют находящийся там газ, в результате чего начинает проходить очень небольшой ток. Падение напряжения, создаваемое этим током, измеряют на резисторе с очень большим сопротивлением.

электричества. Для этого газ нужно поместить в закрытый сосуд (называемый ионизационной камерой) между двух электродов, к которым приложено определенное напряжение. Теперь достаточно замерить проходящий через ионизационную камеру ток — он пропорционален интенсивности излучения, давлению газа и объему камеры (в предположении, что весь газ в камере подвергается воздействию излучения).

Н. — Ты собираешься измерить ток амперметром?

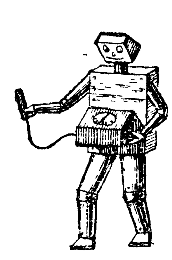
Л. — О, разумеется нет! Даже у самого чувствительного из микроамперметров стрелка отклонилась бы только в случае использования гигантской камеры, подверженной чудовищному облучению. На практике приходится сталкиваться с токами порядка миллионной доли микроампера или даже еще меньше. Эти токи пропускают (рис. 30) через резисторы с чрезвычайно большими сопротивлениями (несколько тысяч или миллионов мегом), а разницу потенциалов на их выводах замеряют уже упоминавшимся электрометрическим усилителем, о котором мы еще будем говорить.



Н. — Значит, твой метод с ионизационной камерой совсем нечувствительный?

Л. — Чувствительность мала, но она позволяет измерять излучения в очень широком диапазоне интенсивностей: от таких, которые человек без особого вреда выдерживает десятки часов, до могущих убить его в одну минуту.

Н. — В последнем случае я предпочел бы держать ионизационную камеру на конце длинного шеста!



Л. — Нередко делают еще лучше — измерения поручают проводить управляемым по радио роботам. При измерении менее интенсивных излучений применяют счетчики Гейгера-Мюллера, в которых ионизирующие свойства используются иначе, чем в ионизационной камере.

Н. — Что это за инструмент?

Л. — Он чрезвычайно прост и представляет собой запаянную колбу, заполненную газом с низким давлением. В колбе находится металлическая трубочка, в которой проходит изолированный от нее провод (рис. 31). Если создать некоторую разность потенциалов между проводом и трубочкой, то получим...

Н. — ... ионизационную камеру.

Л. — Действительно сходство большое, и наш счетчик можно было бы использовать как ионизационную камеру. Но приложенная разность потенциалов относительно велика — она близка к той, которая требуется для начала электрического разряда газа в колбе. Если ядерная частица пройдет через газ, она может вызвать электрический разряд.

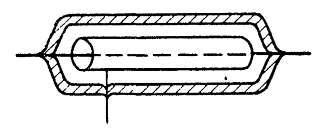
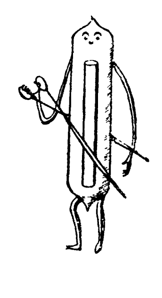


Рис. 31. Счетчик Гейгера-Мюллера. Трубочка с натянутой по ее оси проволокой помещена в колбу, заполненную газом с низким давлением. Ионизация, вызываемая каждой ядерной частицей, приводит к электрическому пробою в газе колбы.



Н. — Точно так же, как и в ионизационной камере.

Л. — Нет, и по двум причинам. Во-первых, разность потенциалов между двумя электродами достаточно высока, чтобы под воздействием местной ионизации, вызванной ядерной частицей, лавинообразно ионизировался весь газ в колбе и возник электрический разряд. Во-вторых, мы не ставим задачу измерять возникающий электрический ток, а стараемся лишь установить, сколько раз в секунду произошло это явление.

Н. — Так значит нам нужно сосчитать импульсы, а их может быть очень много. Это не очень практично. Но ты мне сказал, что ионизация становится общей под воздействием напряжения трубка — провод, а как же она тогда гаснет?

Л. — Полезное замечание. Действительно, если не предпринять специальных мер, она не погаснет. Для этой цели можно использовать электронную схему, называемую схемой гашения, которая после импульса ионизации значительно снижает напряжение на выводах счетчика и тем самым вызывает деионизацию. Но наилучшее решение заключается во введении в находящийся в колбе газ небольшого количества паров спирта или брома; тяжелые молекулы примеси своей инерцией вызовут деионизацию газа в счетчике сразу же после его ионизации, получится самогасящийся счетчик. Посмотри, я принес с собой такой счетчик. Я подаю на него питание, а к выводам резистора, по которому протекает ток центрального проводника, подключен вход усилителя. Громкоговоритель на выходе усилителя позволит нам услышать импульсы. Я подношу к нашему счетчику кусочек уранита (руды, содержащей радий и уран); слышишь, как часто следуют один за другим щелчки?



Н. — Да, но звук производит странное впечатление, это не музыкальная нота. Несомненно причина в том, что звук порождается импульсами, а не синусоидами.

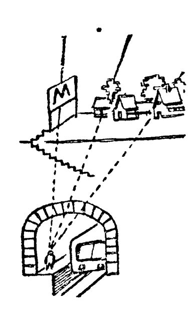
Л. — Совсем нет, Незнайкин. Распады ядер атомов подчиняются только закону случая. Может случиться так, что в одну секунду произойдет только один распад, а в следующую — десять. Эти импульсы следуют один за другим так же неравномерно, как стучат капли дождя по крыше. Но тем не менее можно установить средний темп в виде количества ударов в минуту (если за минуту происходит достаточное количество распадов, чтобы мог проявиться закон больших чисел).



Н. — А теперь убери подальше свой уранит. Постой, здесь наверное спрятано какое-то радиоактивное вещество — щелчки продолжаются, правда, они стали очень редкими.

Космические лучи

Л. — То, что ты слышишь сейчас, Незнайкин, космические лучи, таинственные лучи, возникающие в верхних слоях атмосферы под воздействием прилетающих из звездного пространства частиц и падающих на нас как непрерывный довольно слабый дождь. Они аналогичны гамма-излучению, но обладают большей проникающей способностью: несколько метров бетона не останавливает и 10% космических лучей. Они причиняют много хлопот при измерениях, так как избавиться от них невозможно и приходится производить измерения с учетом наличия этих лучей, как если бы мы захотели производить измерения света, не имея возможности добиться в помещении полной темноты.

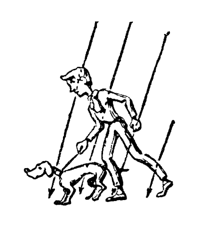


Н. — О! Тебе не следовало этого мне говорить. Непрерывно пронизывающие меня насквозь лучи не способствуют хорошему настроению.

Л. — Успокойся, Незнайкин. Космические лучи пронизывают тебя точно так же, как всегда пронизывали все человечество, но мы себя от этого хуже не чувствуем.

Н. — Ну, ладно, но скажи мне, какие лучи можно обнаружить твоим счетчиком?

Л. — Все лучи, обладающие ионизирующими свойствами и достаточной проникающей способностью, чтобы достичь трубочки счетчика: все виды гамма-лучей, бета-лучи с достаточной проникающей способностью (особенно, если стенка колбы счетчика тонкая) и даже некоторые виды альфа-лучей, если на конце счетчика сделано тонкое окошко из пропускающего эти лучи материала, например из слюды. Во всяком случае счетчик Гейгера представляет собой высокочувствительный измерительный прибор: он начинает вырабатывать импульсы, значительно учащенные по сравнению с импульсами, вызываемыми космическими лучами, уже при очень низких уровнях радиации, не представляющих никакой опасности для человека, например, при радиации от небольшого количества радиоактивной руды. Поэтому эти счетчики используют в геологической разведке и в научных исследованиях для обнаружения излучения.

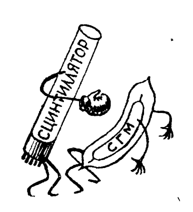


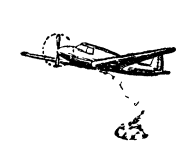
Сцинтилляционный счетчик

Н. — Так, значит, счетчик Гейгера-Мюллера самый чувствительный прибор для обнаружения ядерных излучений?

Л. — Нет, его рекорд по чувствительности побит сцинтилляционным счетчиком.

Н. — Что это за прибор? Мне кажется, что ты уже упоминал о нем, когда рассказывал о фотоэлементах с умножением электронов?





Л. — Действительно. Здесь используется кристалл или кусочек специальной пластмассы, обладающей свойством давать вспышку света при попадании ядерной частицы. Этот кристалл помещается рядом с фотокатодом фотоумножителя (рис. 32). Фотокатод закрыт от воздействия постороннего света черной бумагой или каким-либо иным непрозрачным слоем, через который должны пройти частицы прежде, чем попасть на кристалл. Ток фотоумножителя складывается из серии импульсов, средний ритм следования которых и замеряется. Этот метод настолько чувствителен, что он позволяет обнаруживать радиоактивные руды

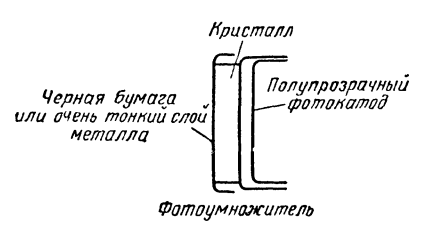
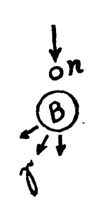


Рис. 32. Ядерные частицы проходят через черную бумагу или тонкий слой металла (их задача не пропустить свет) и попадают на кристалл. На каждую частицу кристалл реагирует вспышкой света, обнаруживаемой фотоумножителем, на который наклеен кристалл

с движущегося автомобиля или с самолета, пролетающего над обследуемой местностью. Кроме того, сцинтилляционный счетчик на каждую частицу вырабатывает импульс, пропорциональный ее энергии, тогда как у счетчика Гейгера все импульсы одинаковые. Это свойство позволяет производить измерение энергетического спектра изучаемых частиц.

Об измерениях в ядерной технике можно было бы разумеется написать целые тома, но я полагаю, что для себя мы уже исчерпали эту тему.

Н. — Я с тобою не согласен и пока еще не чувствую себя истощенным... Ты ничего не рассказал ни об обнаружении нейтронов, ни об использовании изотопов, ни об ином, кроме техники безопасности, использовании измерений радиоактивности как, например, в геологической разведке или в научных исследованиях.



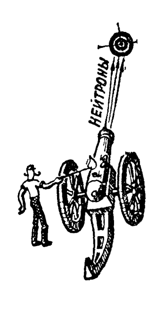
Л. — Постараюсь ответить на твои вопросы по порядку. Начну с нейтронов; установлено, что, сталкиваясь с атомом бора, они вызывают серию ядерных реакций, сопровождающихся гамма-излучением. Поэтому для обнаружения нейтронов достаточно покрыть пластинку борной кислотой и поместить ее рядом с ионизационным или сцинтилляционным счетчиками.

Н. — В самом деле, это представляется мне очень простым.

Использование изотопов

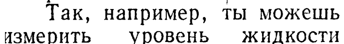
Л. — Радиоактивные изотопы представляют собой вещества, искусственно создаваемые путем бомбардировки нормальных атомов колоссальным потоком нейтронов, получаемым, например, в ядерном реакторе. Эти нейтроны могут проникнуть в атом и врасти в его ядро. Полученный таким образом новый изотоп часто бывает неустойчивым и радиоактивным. Он повсюду сопро

вождает нормальное вещество, но испускает ядерные лучи, которые позволяют его заметить. Например, при нейтронном облучении в реакторе куска стали, скажем, поршневого кольца, образуются атомы радиоактивного изотопа железа. Измеряя радиоактивность масла, используемого для смазки двигателя, в котором установлено такое кольцо, можно определить степень его износа. С помощью радиоактивных изотопов удалось нанести на атомы своеобразную метку, и атомы перестали быть анонимными, как раньше. Метка позволяет посредством физических измерений следить за атомами, точно так же как кольцо с номером на лапке позволяет опознать почтового голубя. Таким же образом можно проследить распределение йода (к которому подмешано небольшое количество радиоактивного изотопа йода) при заболевании щитовидной железы; если обвести вокруг тела больного счетчиком Гейгера, то он покажет, где сосредоточен радиоактивный, а следовательно, и обычный йод. Я думаю, что этим я ответил на твой третий вопрос. Попутно отмечу, что радиоактивные изотопы используются для просвечивания непрозрачных для обычного света предметов.



Источник

Рис. 33. Даже в непрозрачном баке можно измерить уровень жидкости. В зависимости от высоты уровня жидкость больше или меньше поглощает ядерное излучение источника; прошедшее излучение измеряется счетчиком.



Так, например, ты можешь измерить уровень жидкости в непрозрачном стальном баке, если с одной стороны поместишь источник радиоактивного излучения, а с другой стороны — счетчик Гейгера (рис. 33); чем выше уровень жидкости, тем сильнее поглощается излучение. Таким же образом можно измерить толщину выходящего из прокатного стана стального листа — достаточно лишь определить, какая часть ядерного излучения прошла через этот стальной лист.



Н. — Этот метод представляется многообещающим.

Л. — У меня нет времени, а то я рассказал бы тебе об обнаружении изъянов в толще металла, об очистке, о медицинских и многих других областях использования радиоактивных изотопов. В заключение этого раздела я хочу рассказать тебе о датчиках, чувствительных к химическому воздействию.

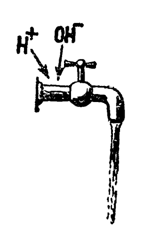
Электрохимия ионов

Н. — Но в химии я не так-то силен.

Л. — Беда не велика. Тебе сейчас достаточно лишь знать, что химические реакции представляют собой не что иное, как электрические взаимодействия между различными ионами (сейчас я говорю только о химии растворов). Кислотой называют вещество, которое в растворе освобождает водородные ионы H^+, т. е. водородные атомы, потерявшие свой электрон.

Н. — Следовательно, это протоны.

Л. — Совершенно верно. И эти протоны горят желанием возвратить утерянный электрон, и чаще всего они забирают его у отрицательных ионов, обладающих избытком электронов. Например, в растворах имеются ионы, именуемые гидроксильной группой OH^-, состоящие из одного атома кислорода, одного атома



водорода и одного лишнего электрона. Эти ионы стремятся соединиться с *ионами* H^+.

Н. — И что получается в результате?

Л. — Просто-напросто вода H_2O — нейтральное соединение. Молекулы воды в свою очередь имеют некоторую тенденцию распасться на ионы H^+ и OH^-, но таких молекул крайне мало: чистая вода очень плохо проводит электрический ток. Происходящую реакцию записывают следующим образом:

$$H_2O \rightleftarrows H^+ + OH^-.$$

Двойная стрелка обозначает, что реакция может происходить в обоих направлениях, но происходит она преимущественно в направлении справа налево. На основе одного химического закона можно доказать, что произведение количества содержащихся в воде ионов H^+ (концентрация, обозначается $|H^+|$) на количество содержащихся в воде ионов OH^- (обозначается $|OH^-|$) всегда постоянно и равно $|H^+| \times |OH^-| = 10^{-14}$.

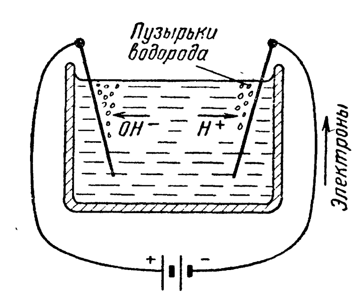
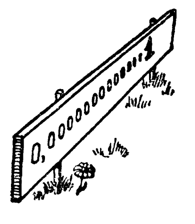


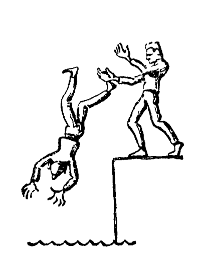
Рис. 34. Если к двум опущенным в воду электродам приложить разность потенциалов, то ионы H^+ направятся к катоду, где получат недостающий им электрон и превратятся в водород. Это явление называется электролизом (ионы OH^- отдают свой заряд на аноде и разлагаются с выделением кислорода).



Н. — В самом деле, не очень много! Это составляет одну стотысячную одной миллиардной! Как же обозначают цифрами такие концентрации?

Л. — Их выражают в «грамм-ионах на литр» (*г-ион/л*), т. е. числом, показывающим, сколько раз 1 *г* ионов H^+ или 17 *г* ионов OH^- содержатся в литре (что соответствует $6 \cdot 10^{23}$ настоящих ионов). Само собой разумеется, что взвесить ионы нельзя, так как нет возможности получить их в свободном состоянии. Но их количество можно определить косвенными методами. Например, можно возвратить ионам H^+ недостающие им электроны, в результате чего получится газ водорода (рис. 34), объем которого можно замерить, а это даст нам и вес (примерно 1 *г* на 11 *л*).

Показатель pH



Н. — По твоему уравнению диссоциации количество ионов H^+ должно точно соответствовать количеству ионов OH^-. Разве не так?

Л. — Да, если бы я не добавил в воду постороннее вещество. Ну и раз ты находишься на верном пути, скажи мне, какова концентрация ионов H^+ в чистой воде.

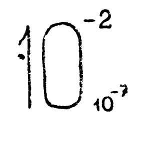
Н. — Это можно рассчитать. Если $|H^+| = |OH^-|$, а их произведение равно 10^{-14}, то концентрация каждого из названных ионов составляет 10^{-7}.

Л. — Прекрасно. Если теперь я добавлю в воду кислоту, которая высвобождает большое количество ионов H^+, то концентрация ионов OH^- снизится, потому что произведение $|H^+| \times$

$\times \mid OH^- \mid$ останется равным 10^{-14}. Чем больше ионов H^+, тем более выраженный кислотный характер приобретает раствор. Теперь принято измерять количество ионов H^+ в растворе и обозначать его логарифмом в сопровождении значка H^+, эту величину называют водородным показателем pH раствора.

Н. — О! Опять логарифмы! Они приводят меня в ужас.

Л. — Все это не так страшно. Запомни только логарифмы некоторых чисел:



10^0	логарифм 0
10^{-1} или 0,1	логарифм —1
10^{-2} или 0,01	логарифм —2
10^{-3}	логарифм —3
10^{-4}	логарифм —4 и т. д.

Н. — Значит, логарифм всего лишь показатель степени числа 10?

Л. — Видишь, ты сам это понял. Когда говорят, что pH раствора, например, 6, это означает, что концентрация ионов H^+ в этом растворе составляет 10^{-6}. Ты знаешь, что очень чистая вода имеет показатель pH, равный 7. У кислых растворов показатель pH меньше 7 ...

Н. — Нет, ты ошибаешься! В кислых растворах концентрация ионов H^+ выше.



Л. — Подожди, Незнайкин, разве ты не согласен, что 10^{-2} (или 0,01) все же больше, чем 10^{-7} (или 0,0000001)?

Н. — Согласен, ты прав. Но скажи, пожалуйста, до какого уровня может опуститься показатель pH в очень кислых растворах?

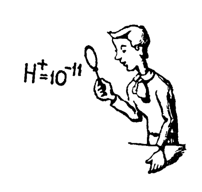
Л. — При pH = 0 в растворе в каждом литре содержится 1 грамм-ион H^+. А так как концентрация этих ионов может быть немного выше, то величина pH может спуститься несколько ниже нуля — почти до —1.

И наоборот в основных (или щелочных) растворах, куда добавили ионов OH^-, концентрация ионов H^+ опускается ниже уровня 10^{-7} и может дойти до 10^{-14} (когда на каждый литр раствора приходится 1 грамм-ион OH^-) и показатель pH может достичь 14. Иногда показатель может еще повышаться почти до 15, но эти случаи носят скорее характер исключения, чем правила.

Измерение pH

Н. — Но тогда величину pH совершенно невозможно измерить?

Л. — Почему ты думаешь, что при высоких значениях pH, иначе говоря у щелочных растворов, труднее измерить этот показатель?



Н. — Да потому, что даже с помощью точных измерительных приборов невозможно измерить количество ионов, когда в литре их всего лишь 10^{-12} или того меньше.

Л. — Ты совершенно прав, если пользоваться химическими методами (они бессильны уже при pH = 3). На практике же пользуются электрическими измерениями. Установили, что, когда тонкая перегородка из специального стекла разделяет два раствора с pH соответственно pH_1 и pH_2 (рис. 35), образуется электрическая батарея, э. д. с. которой примерно равна:

$$E = E_0 + 0{,}06\,(pH_1 - pH_2),$$

где E_0 постоянная величина, зависящая от нескольких факторов.



Когда хотят измерить pH какого-нибудь раствора, в него опускают небольшой шарик из специального стекла, в который налит кислый раствор с известным pH и опущена платиновая проволочка. Это приспособление называют стеклянным электродом.

Н. — Любознайкин! Все имеет свой предел, ну, хватит надо мною смеяться! Ведь стекло прекрасный изолятор (к счастью для электронных ламп). Как можно сделать электрод из стекла, которое не проводит электрического тока?

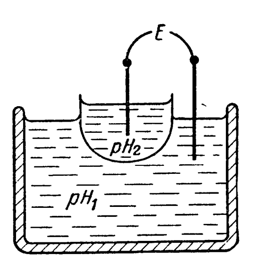
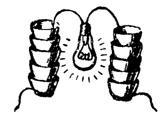


Рис. 35. Разделяя тонкой стеклянной перегородкой (из стекла, с не очень хорошими свойствами изолятора) два раствора с разными pH, вызывают появление разности потенциалов, которая пропорциональна разности pH этих растворов.



Л. — Конечно из обычного нельзя, но ведь я тебе сказал, что для этой цели берут специальное стекло. Но даже такое стекло совершенно не годится для электрической проводки в твоей квартире. Высокое сопротивление стеклянного электрода — большой недостаток этого весьма практичного приспособления. Сопротивление составляет от 50 *Мом* до нескольких тысяч мегом.

Н. — Иначе говоря, это не проводник, а плохой изолятор. А как измеряют потенциал раствора?

Л. — Для этого в раствор опускают другой, так называемый эталонный электрод, который обычно состоит из цепочки: хлористый калий, хлористая ртуть (каломель), ртуть и платина Этот каломельный электрод вместе с платиновой проволочкой и стеклянным электродом образуют электрический элемент, э. д. с. которого и замеряют. Электродвижущая сила элемента связана с pH исследуемого раствора линейной зависимостью

$$E = A + 0{,}06\ \mathrm{pH},$$

т. е. изменяется на 60 *мв* на каждую единицу pH. Постоянная величина A зависит от каломельного электрода и от концентрации известного раствора в колбочке из специального стекла. Завод-изготовитель указывает эту величину в паспорте электродов.

Н. — Значит, нам остается всего лишь измерить электродвижущую силу этой батареи, и дело в шляпе!

Л. — Мне очень нравится твое «всего лишь...» Представь себе, какие проблемы возникают при измерении с точностью лучше 1 *мв* напряжения на клеммах батареи, внутреннее сопротивление которой может превышать 1 000 *Мом*. Это удается осуществить лишь с помощью специального так называемого электрометрического усилителя.

Н. — Опять!.. Я начинаю думать, что фотоэлемент и электрометрический усилитель представляют собой два краеугольных камня электроники.

Окислительно-восстановительный потенциал

Л. — В нашей следующей беседе мы рассмотрим устройство электрометрических усилителей, которые действительно играют довольно важную роль в электронике. Но прежде чем мы добе-

ремся до них, нам предстоит поговорить еще об одной важной величине в химии растворов — об окислительно-восстановительном потенциале (или о потенциале Редокса). Знаешь ли ты, что такое окислитель?

Н. — Да, в свое время мне объяснили, что окислителями называют вещества, способные выделить кислород или забрать из воды водород, чтобы выделить из нее кислород.

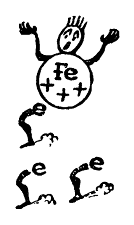


Л. — Приведенное тобой определение было совершенно правильно лет пятьдесят тому назад. Но и сейчас, к сожалению, его можно найти во многих современных книгах. На самом же деле общее и более правильное определение следующее: о к и с л и т е л ь в р а с т в о р е — э т о и о н, к о т о р ы й м о ж е т с о о б щ и т ь д р у г и м и о н а м и л и а т о м а м п о л о ж и т е л ь н ы е з а р я д ы (и л и, в е р н е е, з а б р а т ь э л е к т р о н ы). Так, например, ионы железа, лишенные трех электронов и поэтому обладающие тремя положительными зарядами, имеют тенденцию захватить электрон и превратиться в ионы только с двумя положительными зарядами

$$Fe^{+++} + e \rightleftarrows Fe^{++}.$$

Н. — Почему так? Почему бы им не захватить сразу три электрона и не стать опять порядочным металлическим железом?

Л. — Это тоже возможно, но ионы железа «жаждут» заполучить первый недостающий электрон и в значительно меньшей степени два других. Иначе говоря, ионы двухвалентного железа обладают определенной стабильностью, несвойственной ионам трехвалентного железа. Или, проще говоря, ионы трехвалентного железа голодны на электроны, но проглотив первый электрон, они изрядно успокаиваются.



Н. — Хорошо, но в твоей формуле содержится еще кое-что, что меня удивляет. Почему реакция обратима?

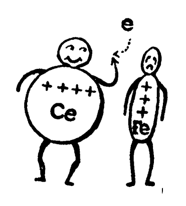
Л. — Это очень просто, если ионы двухвалентного железа окажутся рядом с более голодным, чем ион трехвалентного железа, «пожирателем электронов» (окислителем), то произойдет реакция в направлении справа налево.

Н. — Мне очень понравилось выражение ионы, «голодные на электроны», но это определение носит скорее качественный характер. Как узнать, что один ион более голоден на электроны, чем другой?

Л. — Что я слышу, Незнайкин? Ты просишь меня перейти к количественному определению! Но успокойся, это, впрочем, очень просто. Если свести вместе ионы трехвалентного железа и ионы двухвалентного олова (с двумя положительными зарядами), то ионы трехвалентного железа будут восстановлены до состояния ионов двухвалентного железа, пока остаются ионы двухвалентного олова, которые могут окислиться до ионов четырехвалентного олова (с четырьмя положительными зарядами):

$$2Fe^{+++} + Sn^{++} \rightarrow 2Fe^{++} + Sn^{++++}.$$

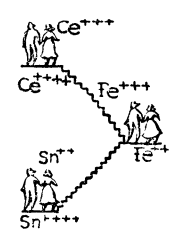
На этот раз реакция необратима, и она продолжается до полного исчезновения одного из исходных компонентов.



И, наоборот, если свести вместе ионы двухвалентного железа и ионы четырехвалентного церия (с четырьмя положительными зарядами), то они будут восстановлены до состояния ионов трехвалентного церия (с тремя положительными зарядами) и полностью окислят ионы двухвалентного железа

$$Ce^{++++} + Fe^{++} \rightarrow Ce^{+++} + Fe^{+++}.$$

Следовательно, смесь ионов двух- и трехвалентного железа может окислять ионы двухвалентного олова и восстанавливать



ионы четырехвалентного церия. Это показывает, что смесь Fe^{++}/Fe^{+++} более жадна на электроны, чем смесь Sn^{++}/Sn^{++++}, но менее жадна, чем смесь Ce^{+++}/Ce^{++++}.

Каждую из этих смесей характеризуют потенциалом, который носит название окислительно-восстановительного потенциала и представляет собой просто-напросто разность между потенциалом опущенного в раствор индифферентного электрода и потенциалом этого раствора.

Н. — Почему пользуются индифферентным электродом?

Л. — Чтобы он обменивался с раствором только электронами, но не ионами. Для этого, как правило, берут платину; измеряют разность потенциалов между платиновой проволочкой и

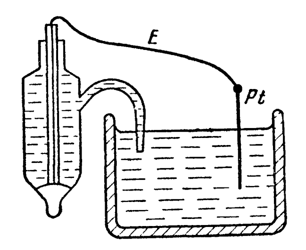


Рис. 36. Для измерения окислительно-восстановительного потенциала раствора в этот раствор опускают индифферентный электрод из платины и эталонный электрод.

раствором. Измерение производят с помощью эталонного электрода, чаще всего из каломели (рис. 36). Разность потенциалов может быть от —1 *в* (энергичные восстановители) до +2 *в* (очень сильные окислители).



Н. — И для этих измерений тебе, естественно, понадобится электрометрический усилитель?

Л. — На этот раз нет. Внутреннее сопротивление электрода из каломели мало, внутреннее сопротивление раствора тоже, и поэтому можно ограничиться хорошим контролером. Но способный на сложную работу может выполнить и более простую, и поэтому обычно пользуются электрометрическим усилителем, который служит для измерения pH.

Н. — Мне в голову пришла идея, она, вероятно, идиотская, но тем не менее я хочу тебе рассказать о ней. По сути дела эти ионы H^{+}, иначе говоря протоны, жаждут захватить электроны, чтобы вновь стать водородом из порядочной семьи. Нельзя ли рассматривать их как небольшие окислители?

Л. — Они и есть окислители. Воздействие кислоты, иначе говоря ионов H^{+}, на металл представляет собой реакцию окисления металла. Можно связать теорию окисления с теорией воздействия кислоты, но это увело бы нас слишком далеко от нашей темы. Но ты видишь, насколько расширились твои «допотопные» представления об окислении?

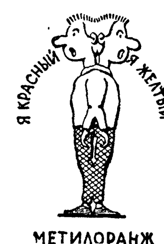


Старые методы измерения pH

Н. — Просто безмерно. Но я полагаю, что показатель pH появился всего лишь несколько лет тому назад: ведь до широкого вторжения в нашу жизнь электроники, которая одна позволяет использовать стеклянный электрод, измерять этот показатель было невозможно.

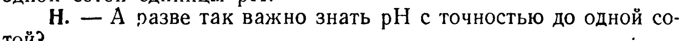
Л. — И тем не менее это удавалось осуществить. Сначала пользовались красящими веществами, состав и цвет которых изменялись в зависимости от величины pH, как, например, ме-

тилоранж (гелиантин), имеющий красный цвет в среде с pH ниже 3 и желтый цвет в среде с pH выше 5. Использовали также так называемый водородный электрод, состоящий из платиновой проволочки, покрытой губчатой платиной и платиновой чернью (порошкообразный металл), на который непрерывно подают газообразный водород. Этот электрод обладает низким внутренним сопротивлением, но он неудобен в работе и чувствителен ко многим вносящим помехи явлениям, от которых свободен стеклянный электрод.



МЕТИЛОРАНЖ

Существуют также бумаги, покрытые смесью красящих веществ, которые при попадании на них капли раствора принимают окраску от красной до фиолетовой в диапазоне pH от 1 до 10. Величину pH измеряют путем сравнения полученной окраски с эталонной цветной шкалой. Но в этом случае ты ограничен точностью в одну единицу, тогда как правильно проведенные измерения электрическим методом позволяют получить точность до одной сотой единицы pH.



Н. — А разве так важно знать pH с точностью до одной сотой?

Л. — Очень важно. Например, показатель pH крови имеет строго постоянную величину и даже очень ничтожные изменения свидетельствуют о серьезном заболевании.

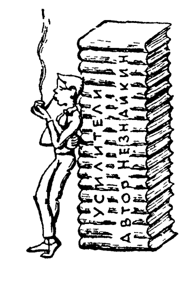
Н. — О, как жалко, что у меня нет pH-метра для наблюдения за моим здоровьем!..

■

Беседа пятая

Создав богатый запас различных датчиков, наши друзья приступают к рассмотрению использования вырабатываемых датчиками сигналов. Для этого, оказывается, полезно улучшить технические характеристики знакомых Незнайкину усилителей и, в частности, расширить полосу пропускания как в сторону высоких, так и в сторону очень низких (и даже нулевой) частот. В конце беседы Любознайкин открывает своему другу «секрет», который сотни тысяч технических специалистов познали ... и, несомненно, забыли, потому что никогда не видели, какую пользу можно из него извлечь.

Усилители постоянного тока



Незнайкин — Итак, дорогой Любознайкин, я надеюсь, что на этот раз ты не станешь больше говорить о датчиках, ибо от них меня уже тошнит.

Любознайкин — Не беспокойся, Незнайкин, сегодня мы перейдем к другой части нашей схемы — к преобразователю, иначе говоря, к вопросу о преобразовании вырабатываемого датчиком сигнала. Мы начнем с преобразования, касающегося лишь величины сигнала, иначе говоря с усиления.

Н. — Ну это не займет у нас много времени. Я знаю все усилители, кроме электрометрического.

В области верхних частот

Л. — Скромность всегда тебя украшала. Ты знаешь, как делают для радиоприемника усилитель низкой частоты, предназначенный для воспроизведения звуковых частот от 30 *гц* до 15 *кгц*. Но при усилении других сигналов может возникнуть

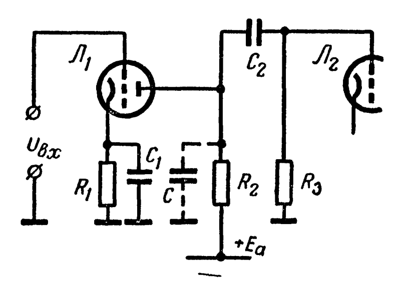


Рис. 37. В этом усилительном каскаде усиление на низких частотах снижается вследствие увеличения реактивного сопротивления конденсатора C_1 и особенно C_2.

потребность намного расширить полосу пропускания как в сторону низких, так и в сторону высоких (верхних) частот. Я поставил бы тебя в трудное положение даже одним вопросом, если бы спросил, что ты сделаешь, чтобы увеличить верхний предел частот, пропускаемых усилителем на резисторах.

Н. — Дай немного подумать. Я полагаю, что ты хочешь поговорить о таком усилителе, схему которого я нарисовал на рис. 37.

Л. — Да, он прекрасно подходит для нашей беседы. Расскажи мне, пожалуйста, о его возможностях.

Н. — Усиление на верхних частотах ограничено тем, что параллельно резистору R_2 включена паразитная емкость C, шунтирующая его и снижающая величину результирующего сопротивления.



Л. — Совершенно верно. А как избавиться от этого?

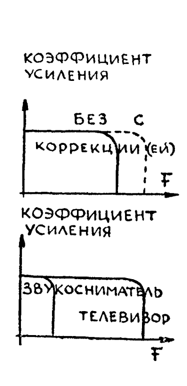
Н. — Прежде всего я попытался бы уменьшить паразитную емкость путем предельного укорочения соединительных проводников и правильным подбором ламп.

Л. — Ты поступаешь разумно. Но возможности избранного тобою пути довольно ограничены. Может быть тебе и удалось бы наполовину уменьшить эту паразитную емкость и тем самым вдвое увеличить полосу пропускания, но как расширить ее еще больше?

Н. — А! Вспомнил, можно воспользоваться коррекцией, компенсирующей шунтирование емкостью C резистора R_2.

Коррекция — не выход из положения

Л. — Я не могу тебе сказать, что это неправильно, но коррекция представляет собой прием, позволяющий несколько расширить полосу пропускания; и поэтому она совершенно не характерна для широкополосного усилителя. Ты совершаешь ту же самую ошибку, что и 99% радистов. В моем телевизоре имеется усилитель, правильно усиливающий частоты от 10 *гц* до 10 *Мгц*; в нем, конечно, имеется коррекция, но и без нее мой усилитель очень хорошо пропускал бы частоты до 5 *Мгц*, а вот усилитель в моем радиограммофоне разумеется на такой подвиг неспособен: уже на 300 *кгц* он теряет 90% своего усиления. Следовательно, между двумя усилителями есть существенное различие. Я полагаю, что ты сам найдешь ответ. Почему мешает тебе эта паразитная емкость C?



Н. — Я уже объяснил тебе: она шунтирует резистор и на высоких частотах снижает величину результирующего сопротивления.

Л. — Я хотел бы внести некоторые уточнения. Предположим, что емкость C равна 16 *пф* (чтобы упростить расчеты ее реактивного сопротивления), тогда ее сопротивление равно 1 *Мом* на 10 *кгц*, 100 *ком* на 100 *кгц*, 10 *ком* на 1 *Мгц* и 1 *ком* на 10 *Мгц*. Предположим, что сопротивление резистора $R_2 = 100$ *ком*. Скажи, пожалуйста, на какой частоте начнет тебе мешать емкость C?

Н. — Для этого следовало бы рассчитать результирующее (полное) сопротивление включенных параллельно резистора R_2 и емкости C. Но я могу тебе сказать, что на частоте 10 *кгц* влияние емкости C с ее реактивным сопротивлением 1 *Мом* на входное сопротивление устройства, близкое к 100 *ком*, будет очень мало.

Л. — Я бы даже сказал, что ее воздействие на величину полного сопротивления практически равно нулю (не больше 0,5%). Но посмотри, Незнайкин, проходящий по емкости C ток на 90° опережает ток, проходящий по R_2. Я обозначил эти токи стрелками (рис. 38), а вернее векторами, характеризующими их амплитуду и фазу. Для определения полного тока построим прямоугольник, сторонами которого являются две названные стрелки. Диагональ прямоугольника соответствует стрелке, характеризующей полный ток. Но на частоте 10 *кгц* максимальная величина проходящего через конденсатор тока I_C в 10 раз меньше тока, проходящего через резистор. Диагональ прямоугольника

при этом настолько близка к его большей стороне, что их можно спутать. Если ты слышал о теореме Пифагора...

Н. — Хм, очень немного и по правде сказать плохо понял.

Л. — Эта теорема гласит, что диагональ прямоугольника (или гипотенуза прямоугольного треугольника, который пред-

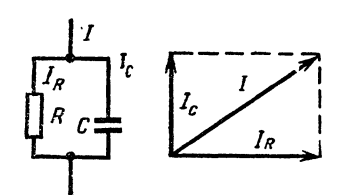
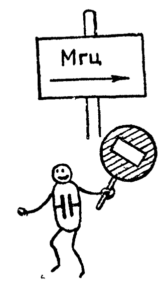


Рис. 38. К R и C приложено одно и то же напряжение, протекающий через конденсатор C ток I_C на 90° опережает I_R (ток, протекающий через резистор). Полный ток I представляет собой векторную сумму токов I_C и I_R.



ставляет собой половину прямоугольника) равна корню квадратному из суммы квадратов его сторон. В нашем случае одна сторона равна 10, а другая — 1, следовательно, сумма квадратов составит 101, а корень квадратный — 10,05.

Н. — Очень любопытно, в самом деле, наличие паразитной емкости на частоте 10 *кгц* никак не сказывается на коэффициенте усиления.

Амплитуда — не фаза

Л. — Емкость C в этом случае не оказывает заметного влияния на коэффициент усиления, но влияет на вносимый усилителем сдвиг фазы. Посмотри: общий ток (диагональ) находится в фазе с приложенным на сетку напряжением $U_c = U_{вх}$, тогда как напряжение на выходе, естественно, находится в фазе с током, проходящим по резистору R_2 (большая сторона). Как ты видишь, между ними уже имеется сдвиг по фазе, пренебрегать которым нельзя (здесь около 6°). Когда же импеданс C будет всего лишь в 3 раза больше сопротивления R_2 (т. е. на частоте 33 *кгц*), образованный стрелками прямоугольник все еще будет довольно вытянутым и его диагональ всего лишь на 5% длиннее большой стороны. Иначе говоря, проходящий по резистору ток будет составлять 95% общего тока, коэффициент усиления еще составит 95% коэффициента усиления на низкой частоте. Но сдвиг фазы станет очень значительным (больше 18°).

Н. — Если ты будешь так продолжать, то дойдешь до того, что скажешь мне, что влияние C на коэффициент усиления так никогда и не почувствуется!

Л. — Вовсе нет. Когда реактивное сопротивление C достигнет величины R_2, т. е. 100 *ком*, прямоугольник, о котором я говорил, станет квадратом. Сторона квадрата равна всего лишь 0,7 его диагонали ($1 : \sqrt{2}$), коэффициент усиления в этом случае снизится до 0,7 своего значения на низких частотах, сдвиг фазы увеличится до 45°, т. е. мы достигли так называемой «граничной» частоты, на которой коэффициент усиления снижается на 30% от своего максимального значения. Говорят, что он снизился на 3 *дб* и ...

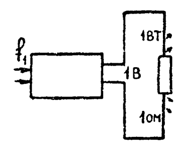
Н. — С децибелами я немного не в ладах.

Децибелы

Л. — И вместе с тем это очень просто. Белы (обычно пользуются десятыми долями этой величины) выражаются логарифмом отношения мощностей.

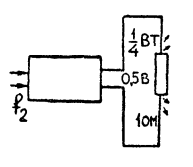
Н. — Ну вот, я сделал большой шаг вперед. Для начала логарифмы, к которым особой любви я не чувствую, а в дополнение еще история с отношением мощностей, когда мы имеем дело с усилением по напряжению и...

Л. — Правильно, Незнайкин, здесь имеется определенная трудность, но мы ее устраним. Для начала я вернусь к определению. Когда две мощности P_1 и P_2 не равны, говорят, что одна превосходит другую на *n бел*, т. е.



$$\log \frac{P_2}{P_1} = n.$$

Иначе говоря, когда одна мощность в 10 раз больше другой, говорят, что она больше на 1 *бел* [или 10 децибел (*дб*)]. Если P_2 в 1 000 раз больше P_1, говорят, что P_2 на 3 *бел* (логарифм 1 000 равен 3) или на 30 *дб* больше P_1.



Н. — Странная идея, я предпочел бы сказать «в тысячу раз больше». Ну, наконец, можно согласиться, если так принято... Но как все это применить к усилителю, который не предназначен для передачи мощности?

Л. — Представь себе усилитель, получающий напряжение с постоянной амплитудой при различных частотах. На частоте f_1 он дает на выходе напряжение 1 *в*, которое выделяется на постоянном резисторе в 1 *ом*. Согласен ли ты, что в этом случае выходная мощность равна 1 *вт*?

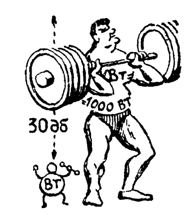
Н. — Потому что мы имеем ток в 1 *а* при напряжении 1 *в*.

Л. — Хорошо. Предположим, что на частоте f_2 выходное напряжение на том же резисторе снижается до 0,5 *в*; какова будет мощность?

Н. — Мощность будет 0,5 *вт*...

Л. — Незнайкин!!! Какую колоссальную глупость ты произвел на свет божий! Что мне с тобой делать?!

Н. — Ой, ой! Да, я вижу: напряжение равно 0,5 *в*, следовательно, ток 0,5 *а*, а мощность всего лишь 0,25 *вт*. Я должен был вспомнить, что мощность пропорциональна квадрату напряжения...



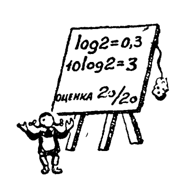
Л. — И мощность в 4 раза меньше первой. А так как логарифм этого числа 0,6, мы можем сказать, что вторая мощность на 0,6 *бел* (или 6 *дб*) меньше первой, и, следовательно, мы можем сказать про усилитель, что его коэффициент усиления снизился на 6 *дб*.

Н. — Я начинаю понимать. Когда говорят: «коэффициент усиления по напряжению снизился на *p дб*», то перед числом *p* подразумевается фраза: «настолько, что выходная мощность усилителя с нагрузкой с постоянным сопротивлением снизилась на ...» Это примерно так же, когда кондуктор автобуса объявляет: «Северный ... занимайте места!», так как он подразумевает: «Пассажиры, едущие в направлении Северного вокзала...»

«Точка 3 дб»

Л. — Я увел тебя в другую сторону, но поздравляю с тем, что ты так хорошо понял. Но вернемся к нашему примеру. Если коэффициент усиления по напряжению снизился до 0,7, то как это выразить в децибелах?

Н. — Попробуем разобраться. Выходное напряжение снизилось до 0,7, следовательно, выходной ток (на постоянном выходном сопротивлении) снизился во столько же раз, значит выходная мощность снизилась до 0,7 × 0,7 = 0,49 (округленно скажем до 0,5 первоначальной величины).



Мощность уменьшилась в 2 раза. Посмотрев в поданную тобой таблицу логарифмов, я вижу, что логарифм 2 почти равен 0,3. Мощность снизилась на 0,3 *бел*, т. е. на 3 *дб*... Постой, ведь это как раз та цифра, которую ты недавно мне назвал!

Когда «эффект конденсатора» становится преобладающим

Л. — Превосходно! Теперь представь себе, что произойдет в анодной нагрузке нашей лампы (рис. 39) на частотах выше той, которой соответствует потеря усиления в 3 *дб*. Ток, который проходит по C (т. е. по паразитной емкости, шунтирующей резистор R_2), больше тока, проходящего по резистору R_2. Основное влияние начинает оказывать ток I_C; отношение $I_R/I_{полн}$ быстро снижается, это же происходит и с усилением. Можно, например, сказать, что на частоте 1 *Мгц*, когда реактивное сопротивление C в 10 раз меньше сопротивления R_2, анодная нагрузка

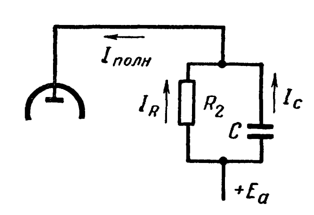


Рис. 39. Полный ток, протекающий через R и C, поступает на лампу. (Здесь показано условно принятое направление движения тока.)

лампы состоит только из C; следовательно, усиление может упасть в 10 раз (на самом деле падение усиления несколько меньше и коэффициент 10 справедлив для пентода, внутреннее сопротивление которого можно считать бесконечно большим по сравнению с величиной R_2).

Н. — Значит, конденсатор C начинает серьезно мешать, когда его реактивное сопротивление падает ниже величины сопротивления R_2?

Л. — Именно это я пытаюсь заставить тебя сказать уже на протяжении четверти часа. Ну, так что же надлежит сделать, чтобы паразитная емкость не мешала на возможно более высокой частоте?

1В 10М 1ВТ

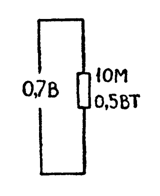
Н. — Уменьшить C.

Л. — Правильно, но это ты мне уже говорил. Что еще можно сделать?

Н. — Но я ничего не вижу. Может быть уменьшить величину R_2?



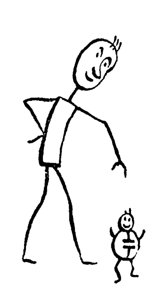
Низкие сопротивления нагрузки



Л. — Наконец-то!.. Конечно, Незнайкин, нужно уменьшить R_2, чтобы реактивное сопротивление C (которое снижается с увеличением частоты) стало меньше сопротивления R_2 на как можно более высокой частоте. Широкополосные усилители обычно рассчитываются на низкое сопротивление анодной нагрузки. В нарисованном тобой усилителе усиление снижается на 3 *дб* на частоте 100 *кгц*. А если бы сопротивление нагрузки было не 100 *ком*, а 1 *ком*, снижение усиления на 3 *дб* произошло бы только на частоте 10 *Мгц*.

Н. — А уменьшив нагрузку до 10 *ом*, мы расширили бы полосу до 1 000 *Мгц*!

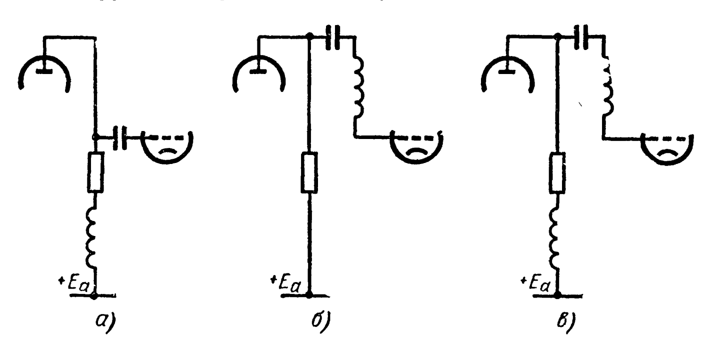
Л. — В принципе ты прав. Но я готов поспорить с тобой на что угодно, что при анодной нагрузке с сопротивлением 10 *ом* усиление твоей лампы по напряжению будет значительно меньше единицы.

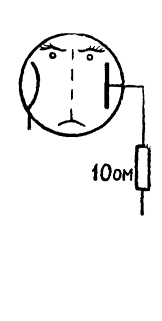


Н. — Какой ужас! Об этом-то я и не подумал. Но скажи, пожалуйста, ведь и с нагрузкой 1 *ком* усиление тоже не очень большое?

Полоса и усиление

Л. — Увы! Всякая медаль имеет свою оборотную сторону. Для улучшения дела используют пентоды с большой крутизной, что позволяет и при низком сопротивлении анодной нагрузки получить не такое уж малое усиление. Кроме того, используют известные коррекции, о которых ты уже мне говорил. В частности, можно включить небольшую катушку последовательно анодной нагрузке — параллельная коррекция (рис. 40, *а*); можно





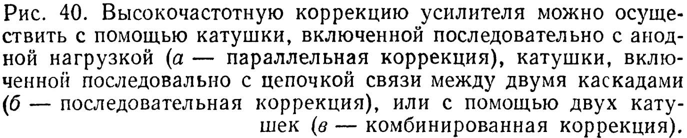
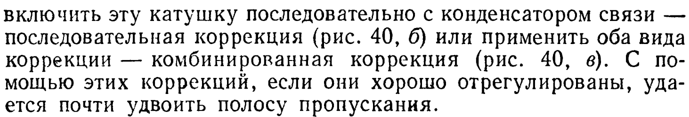


Рис. 40. Высокочастотную коррекцию усилителя можно осуществить с помощью катушки, включенной последовательно с анодной нагрузкой (*а* — параллельная коррекция), катушки, включенной последовально с цепочкой связи между двумя каскадами (*б* — последовательная коррекция), или с помощью двух катушек (*в* — комбинированная коррекция).





включить эту катушку последовательно с конденсатором связи — последовательная коррекция (рис. 40, *б*) или применить оба вида коррекции — комбинированная коррекция (рис. 40, *в*). С помощью этих коррекций, если они хорошо отрегулированы, удается почти удвоить полосу пропускания.

Н. — И до какой частоты можно дойти при использовании всех этих средств?

Л. — Без особого труда удается сделать усилители с верхней границей до 30 или 50 *Мгц*. Можно еще больше расширить полосу, но для этого требуется особый усилитель, получивший название «усилителя с распределенным усилением»; это своего рода линия задержки с включенными в нее лампами, но о нем мы говорить не будем.



Н. — А можно ли устранить сдвиг фазы в такой широкой полосе частот?

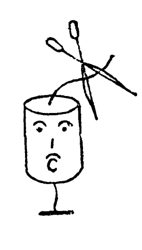
Л. — Это невозможно, да впрочем и не нужно. Достаточно, чтобы сдвиг фазы был пропорционален частоте, но это не всегда легко осуществить.

Низкие частоты

Н. — Я догадываюсь, что последует дальше: после рассказа о способах расширения полосы пропускания усилителя в сторону высоких частот вполне логично заняться расширением полосы в сторону низких частот.

Л. — Правильно. Поэтому скажи мне, что ограничивает усиление твоего усилителя на низких частотах.

Н. — Нет ничего легче! Ограничения вносят реактивные сопротивления конденсаторов, особенно конденсаторов C_1 и C_2 в твоей схеме на рис. 37. Конденсатор C_1 вводит отрицательную обратную связь, а C_2 плохо связывает два каскада. При желании бороться с этими неприятными явлениями я могу увеличить емкость этих конденсаторов.

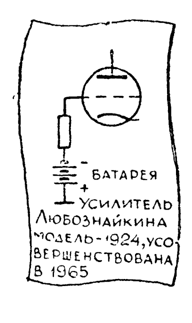


Л. — Согласен, но возможности этого пути весьма ограничены. Емкость конденсатора C_1 и так достигает нескольких микрофарад и значительно увеличить ее невозможно, даже если ты доведешь ее до 100 и особенно до 1 000 *мкф*, то неизбежные в таких конденсаторах токи утечки могут влиять на величину напряжения смещения. Но перейдем к конденсатору C_2; я не советую тебе превышать 1 *мкф*, ибо в противном случае он станет слишком громоздким, а это приведет к значительным паразитным емкостям, не говоря уже о неизбежном токе утечки, который может сделать положительной сетку следующей лампы. Как видишь, этот путь не дает хороших результатов. Чтобы конденсатор C_1 не мешал, его лучше вообще убрать.

Изменим смещение

Н. — Как так? Ведь тогда потенциал катода перестанет быть постоянным и лампа не станет усиливать.

Л. — Позволь мне внести поправку: усиление уменьшится, но лампа будет продолжать усиливать. Своими действиями мы ввели напряжение (напряжение катод — корпус, вернее его переменную составляющую), которое вычтется из входного напряжения, т. е. создается отрицательная обратная связь. А как ты знаешь, отрицательная обратная связь снижает усиление, но одновременно уменьшает искажения и шум, а также дает нам другие выгоды.



Н. — Я высокого мнения о положительных качествах отрицательной обратной связи, но тем не менее очень прискорбно потерять часть усиления, тем более что оно и без того значительно урезано из-за применения низкоомной анодной нагрузки, позволяющей пропустить высокие частоты.

Л. — Мы можем избежать потерь. Для начала можно соединить катод лампы с корпусом, а отрицательное напряжение смещения подать на сетку лампы...

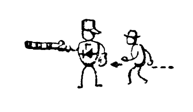
Н. — И из нашей эпохи прогресса электроники ты возвращаешь меня к первым дням истории радио.

Л. — Незнайкин, эволюция техники знает любопытные примеры возврата к прошлому. Но чтобы как-то скрасить возникшее грустное впечатление, я познакомлю тебя с ультрасовременным прибором — диодом Зенера (стабилитроном).

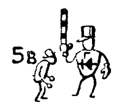
Н. — Раз ультрасовременный, значит полупроводниковый.

Л. — Твое заключение правильно, хотя и пришел ты к нему совершенно нелогичным путем. Диод Зенера представляет собой плоскостной кремниевый диод, который при подаче положительного напряжения смещения ведет себя, как все диоды из порядочной семьи: он пропускает ток при минимальном падении напря-

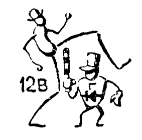
.ения на диоде около 0,7 *в*, которое почти не зависит от проходя-
іего по нему тока. При подаче напряжения смещения обратного
нака, т. е. отрицательного, наш новый знакомый запирается,
ак и все другие диоды, но в отличие от них при достижении
братным напряжением некоторой величины $U_з$, именуемой
напряжением Зенера», обратный ток начинает очень быстро
озрастать без существенного увеличения напряжения на выво-
ах диода.

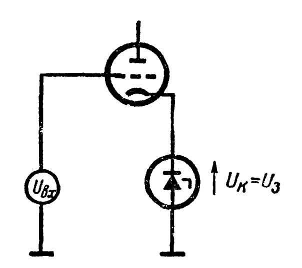


Н. — Это своего рода пробой?



Л. — О, нет! Это совсем другое явление: в диоде не возникает
икаких повреждений, если только не превысили максимально
опустимой относительно большой величины тока. Напряжения
енера могут заключаться в пределах от 3 до 200 *в*. При этом
аилучшими считаются диоды с напряжением Зенера 8 *в*.





'ис. 41. Диод Зенера поддержи-
ает между катодом и корпусом по-
тоянное напряжение $U_к = |U_з|$
напряжение Зенера), которое не
ависит от катодного тока. Этот ме-
од катодного смещения пригоден
для самых низких частот.

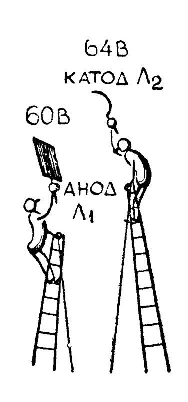
Н. — Очень занятно, но какое отношение имеет этот полу-
роводниковый прибор к усилителям?

Л. — Незнайкин, ты просто лишился воображения. Включи
акой диод между катодом и корпусом усилителя (рис. 41). Ка-
од будет иметь положительный и почти постоянный потенциал,
отому что напряжение на выводах диода Зенера практически
е зависит от проходящего по диоду тока, т. е. от анодного тока.
' тебя отпадет надобность в конденсаторе, а следовательно, исчез-
іут и низкочастотные искажения.

Н. — Вот это здорово! Любопытный пример сотрудничества
іолупроводниковых приборов и ламп, которые обычно выступают
:ак смертельные враги.

Л. — Да нет, Незнайкин, полупроводниковые приборы лам-
ам не враги, и их можно заставить прекрасно работать вместе.
ι теперь, когда мы полностью устранили неприятности, которые
инил нам конденсатор C_1, можно заняться и конденсатором C_2.

Прямая связь

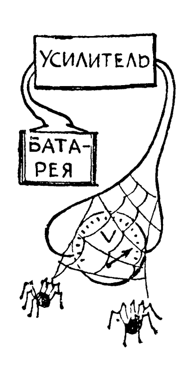


Н. — Я предполагаю, что мы и его уберем из схемы.

Л. — И ты не ошибся, но необходимо проявить осторож-
ость. Что произойдет, если анод первой лампы соединить непо-
редственно с сеткой второй лампы?

Н. — Любознайкин, ведь уже давно я это предложил тебе,
о ты совершенно справедливо возразил, что слишком положи-
ельная сетка следующей лампы притянула бы к себе все элект-
юны.

Л. — Но теперь, когда я сделал катод следующей лампы еще
олее положительным, чем сетка, этого не случится. Предполо-
:им, что анодное напряжение для питания первой лампы равно
00 *в*, что напряжение на ее аноде 60 *в*, тогда, если мы хотим иметь



напряжение смещения на сетке второй лампы — 4 *в*, нам нужн будет подать на ее катод напряжение 64 *в*

Н. — А система получилась совсем неглупая! Какова ж нижняя граница усиливаемой частоты — я не вижу ничего, чт могло бы ее ограничивать?

Л. — Совершенно правильно; нельзя видеть то, чего не Предельная частота просто равна нулю. Мы получили усилител постоянного тока: если на вход подать постоянное напряжени то и на выходе получим такое же.

Н. — Чудесно. Но я вижу в твоей схеме один серьезны недостаток. Напряжение на катоде второй лампы +64 *в*, следов тельно, напряжение анода значительно выше. А если этот анс соединить с сеткой третьей лампы, положение еще ухудшится.

Связь с помощью батареи

Л. — В этом действительно заключается главный недост ток этой системы, которая применяется только для двух ил максимум для трех каскадов. Но что ты скажешь о схеме н рис. 42?



Н. — Любопытно! Более или менее обычная схема, но мен удивляет эта батарея, врезанная в цепочку связи между анодо $Л_1$ и сеткой $Л_2$.

Л. — Подумай. Она поддерживает на постоянном уровн разность потенциалов между анодом $Л_1$ и сеткой $Л_2$; потенциа

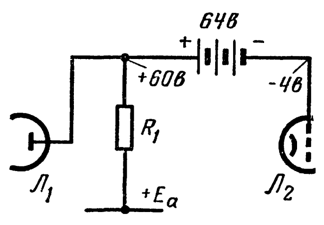


Рис. 42. Батарея с напряжением 64 *в* позволяет соединить сетку лампы $Л_2$ с анодом $Л_1$ и передавать постоянную составляющую

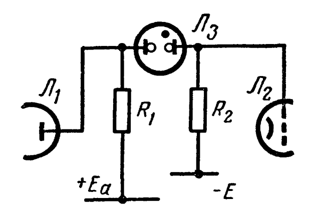
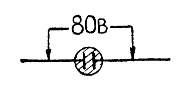


Рис. 43. Неоновая лампа $Л_3$ поддерживаемая в ионизирс ванном состоянии, подклю чена через резистор R_2 источнику — E и играет та кую же роль, что и батаре на рис. 42

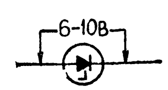
сетки всегда — 64 *в* относительно анода $Л_1$ и, следовательно — 4 *в* относительно корпуса, когда потенциал анода $Л_1$ относитель но корпуса составляет +60 *в*. Поэтому катод $Л_2$ можно замкнут на корпус.

Н. — Очень хитро. Это прекрасное решение проблемы соз дания многокаскадных усилителей постоянного тока.



Л. — Но оно далеко не идеальное. Прежде всего скажем что батареи громоздки, много весят, дорого стоят, образую с корпусом значительные паразитные емкости, а кроме того истощаются.

Н. — Однако они ведь не отдают никакого тока.



Л. — О, знаешь ли ты, что иногда между рекламными заяв лениями и реальной действительностью — целая пропасть.

На каждый каскад требуется батарея и лучше заменит батарею небольшой неоновой лампой. Взгляни на схему рис. 43

Когда по маленькой неоновой лампе $Л_3$ протекает не очень большой ток, на ее выводах поддерживается постоянное напряжение. Сетку лампы $Л_2$ подключают к источнику достаточно высокого отрицательного напряжения через резистор R_2, обладающий довольно большим сопротивлением. Таким образом заставляют ток проходить через лампу $Л_3$, поддерживая газ в ней в ионизированном состоянии. Этот ток очень мал по сравнению с анодным током лампы $Л_1$; неоновая лампа играет роль батареи со схемы на рис. 42. Подобную систему применяют преимущественно в последних каскадах усилителей с прямой связью.

Н. — В принципе твоя неоновая лампа действует как диод Зенера; почему бы не заменить ее одним таким диодом?

Л. — Вообще-то можно, но в схемах с довольно высокими напряжениями и малыми токами предпочтение следует отдать не диодам Зенера, а неоновым лампам. Однако им свойствен один недостаток: полученное на выводах лампы $Л_3$ напряжение не совсем постоянно, ибо содержит переменную составляющую (ее называют напряжением «дыхания» или «свиста»); из-за этой помехи данным методом не следует пользоваться в первых каскадах усилителей с характерными для них низкими напряжениями сигнала.

Связь с помощью делителя напряжения

Н. — Что же тогда делать с первыми каскадами?

Л. — Сейчас я расскажу тебе о методе, который годится для всех каскадов. Для облегчения восприятия воспользуюсь числовым примером. Предположим (рис. 44), что напряжение на аноде $Л_1$ +60 *в*. Я соединяю анод этой лампы с сеткой следующей резистором R_2 сопротивлением 1 *Мом*, эта сетка через резистор R_3 сопротивлением 5 *Мом* подключена к потенциалу —324 *в*.

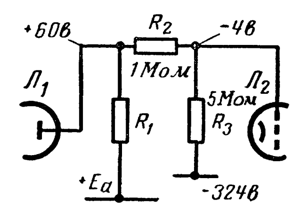
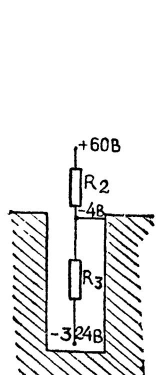


Рис. 44. Ток, протекающий по резистору R_2, создает падение напряжения 64 *в* и тем самым заменяет батарею, показанную на рис. 42.

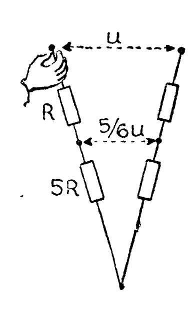
Так как сеточный ток в лампе $Л_2$ полностью отсутствует, один и тот же ток протекает по резисторам R_2 и R_3 (впрочем, этот ток по сравнению с анодным током лампы $Л_1$ очень невелик). Падение напряжения на выводах резистора R_3 в 5 раз больше падения напряжения на резисторе R_2. Обрати внимание, что полное напряжение на цепочке из двух резисторов R_2 — R_3 составляет 60 *в* + 324 *в* = 384 *в*.



В этих условиях падение напряжения составит 64 *в* на R_2 и 320 *в* на R_3, а потенциал сетки лампы $Л_2$ относительно корпуса будет — 4 *в*. Как ты видишь, резистор R_2 в известной мере играет роль неоновой лампы (см. рис. 43) или батареи (см. рис. 42).

Н. — Здесь я с тобой, Любознайкин, не согласен. Падение напряжения на этом резисторе нестабильное: если потенциал анода $Л_1$ увеличится, то в такой же мере увеличится и падение напряжения на резисторе.

Л. — Совершенно верно, но падение напряжения изменится в 6 раз меньше, чем изменится анодное напряжение. Иначе го-



воря, резисторы R_2 и R_3 образуют делитель анодного напряжения с отношением 5 : 6. Разумеется, что в этом случае на сетке лампы $Л_2$ мы получим лишь $^5/_6$ переменной составляющей с анода $Л_1$, но будем иметь по крайней мере 64 *в* постоянного напряжения. На практике, конечно, не пользуются отрицательным напряжением — 324 *в*, а применяют принятые значения и соответствующим образом подбирают резисторы R_2 и R_3.

Н. — Система неплохая. Создавая прямую связь, мы начали с батареи, перешли на неоновую лампу и закончили резистором, т. е. шли по пути упрощения. Но в схеме есть один элемент, который меня беспокоит; в цепи сетки лампы $Л_2$ последовательно включен резистор R_2 сопротивлением 1 *Мом*, но он неблагоприятно повлияет на усиление высоких частот.

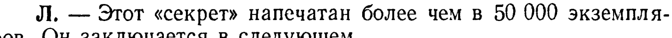
Частотная коррекция делителя



Л. — Изображенная на рис. 44 схема, конечно, гибельна для высоких частот. Но обычно все можно благополучно устроить, включив параллельно резистору R_2 небольшой конденсатор. Конденсатор нужно подобрать таким образом, чтобы произведение его емкости на сопротивление резистора R_2 было равно произведению паразитной емкости входа лампы $Л_2$ $C_{вх}$ на R_3, тогда влияние резистора R_2 на высокие частоты будет устранено. Если $CR_2 = C_{вх}R_3$ (или здесь $C = 5\,C_{вх}$),то делитель напряжения $R_2 \,||\, C/R_3 \,||\, C_{вх}$ «апериодический» (он одинаково пропускает все частоты). Описанное сейчас мною решение считается классическим. Но мне больше нравится другое, более хитрое, которое радисты упорно не хотят знать. Я нашел это решение в одном известном иностранном журнале по электронике, который, по моему мнению, читают очень много специалистов (но, вероятно, только я обратил внимание на сообщение о названном решении).

Н. — Скорее объясни мне суть дела: я сгораю от нетерпения узнать от тебя секрет.

Компенсация отводом от анодной нагрузки



Л. — Этот «секрет» напечатан более чем в 50 000 экземпляров. Он заключается в следующем.

В усилителе, схема которого изображена на рис. 44, стараются получить на сетке лампы $Л_2$ переменную составляющую, которая была бы равна $^5/_6$ того, что имеется на аноде лампы $Л_1$. Представь себе, что я сделал анодную нагрузку не из одного резистора R_1, а из двух последовательно соединенных резисторов R_1' и R_1'' (рис. 45). Я могу так подобрать эти резисторы, чтобы сумма их сопротивлений имела такую же величину, что и R_1, а их величины соотносились бы между собой, как R_2 и R_3

$$R_1' : R_1'' = R_2 : R_3.$$

Иначе говоря, в нашем конкретном случае должно быть:

$$R_1'' = 5R_1'.$$

В общей для обоих резисторов точке A переменная составляющая равна $^5/_6$ той, которая имеется в точке B (благодаря делителю напряжения $R_1' — R_1''$). Эту переменную составляющую с помощью конденсатора C достаточной емкости мы передадим на сетку лампы $Л_2$ (точка D); таким образом мы заставим потенциал точки D иметь переменную составляющую, равную $^5/_6$

переменной составляющей в точке B, а именно к этому мы и стремимся.



Н. — Четыре твоих резистора образуют два делителя напряжения с одним и тем же коэффициентом; можно ли сказать, что это мост Уитстона?

Л. — Совершенно верно, а теперь я расскажу тебе о преимуществах этой системы. Прежде всего, обрати внимание на то, что конденсатор C не обязательно должен иметь точно определенную емкость; достаточно, чтобы она была большой по сравнению с паразитной емкостью входа лампы $Л_2$ $C_{вх}$. В схеме же на рис. 44

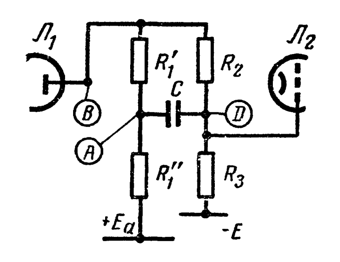
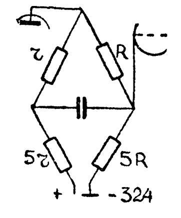


Рис 45. Чтобы показанную на рис. 44 связь сделать апериодической, соединяют конденсатором C точки A и D, замыкая накоротко диагональ уравновешенного моста, так как $R_1' : R_1'' = R_2 : R_3$

нужно было подбирать емкость C в зависимости от паразитной емкости $C_{вх}$, следовательно, требовался подстроечный конденсатор. Однако величина $C_{вх}$ может изменяться при замене лампы и даже у одной лампы при изменении смещения. В схеме на рис. 45 нет ничего похожего. Отпадает необходимость подключать к сетке полупеременный конденсатор (а это всегда сопряжено с неприятностями: такой конденсатор занимает много места, а кроме того, может привести к самовозбуждению схемы). В нашей же схеме достаточно раз и навсегда подогнать резисторы, и все готово; регулировка схемы останется хорошей при любом напряжении смещения и даже при замене лампы $Л_2$. Обычно я ставлю керамический конденсатор емкостью от 220 до 470 *пф*, он очень маленький и удобно размещается при монтаже.



Н. — Любознайкин, ты настолько меня убедил, что я намерен вступить почетным членом в «Ассоциацию по Распространению Схем с Прямой Связью с Отводом от Анодной Нагрузки» (АРСПСОАН).

Л. — Пока ограничься вступлением в «Ассоциацию Людей, Которые, Возвращаясь Домой, Не Будят Своих Родственников», потому что сейчас уже час ночи, а я не хочу, чтобы твоя мамаша меня ругала.

■

Становясь все более требовательным, Незнайкин хочет усовершенствовать усилитель. Он узнает, как повысить входное сопротивление почти до бесконечно большого (в схемах электрометрических усилителей) и как снизить выходное сопротивление. Попутно он обнаруживает, что оптимальное сопротивление нагрузки усилителя может очень сильно отличаться от выходного сопротивления этого усилителя.

Электрометрия — снижение выходного сопротивления

Незнайкин — Ты научил меня, как расширить полосу пропускания усилителя в сторону высоких и в сторону низких частот, но я заметил, что ты ничего не рассказал мне об электрометрических усилителях. А это очень важно!

Входное сопротивление

Любознайкин — Я не могу сразу рассказать обо всем, но сегодня мы займемся этим вопросом. Видишь ли, в электронике часто приходится расширять полосу пропускания усилителей, но не менее полезно повысить их входное сопротивление и снизить выходное.

Н. — Я попросил бы тебя рассказать мне, зачем и какими методами осуществляются изменения этих сопротивлений.

Л. — При работе с усилителем ты подаешь напряжение на его вход, а усиленное напряжение снимаешь с выхода. И у тебя, естественно, возникает желание, чтобы вход потреблял как можно меньший ток от источника напряжения, подлежащего усилению, следовательно, входное сопротивление должно быть высоким. Выход твоего усилителя выполняет роль источника, вырабатывающего сигнал с бо́льшим напряжением, чем поданное на вход. Для достижения хороших показателей этот источник должен вырабатывать значительный ток без существенного падения напряжения, т. е. он должен иметь небольшое внутреннее сопротивление.

Н. — Прекрасно, я понял Значит входное сопротивление определяется входной емкостью и частотой.

Л. — Да, это верно для высоких частот. Но на низких частотах входная емкость не оказывает никакого влияния, так как ее реактивное сопротивление составляет несколько миллионов мегом, получить которые ты безусловно не можешь.

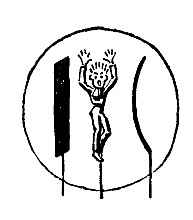
Н. — Понятно, к чему ты подводишь: имеется резистор утечки, который нужно включить между сеткой и корпусом, чтобы отводить электроны, имевшие глупость остановиться на сетке. Я вижу, он включен параллельно входу каскада. Не достаточно ли взять этот резистор с большим сопротивлением, чтобы получить высокое входное сопротивление?

Сеточные токи

Л. — Это невозможно без существенных осложнений. 3 самом деле, через резистор утечки приходится не только эвакуровать электроны, но и восполнять уходящие с сетки.

Н. — Как могут электроны уходить с сетки, ведь она не орячая.

Л. — Ты так думаешь, а ну-ка встань на место сетки...



Н. — Сжалься, там же вакуум...

Л. — Согласен. Но представь себе сетку, находящуюся на асстоянии в несколько десятых или сотых долей миллиметра от аскаленного катода, излучающего на нее тепло: предотвратить агрев сетки очень трудно. А кроме того, не следует забывать возможности фотоэлектронной эмиссии с сетки. Впрочем эту миссию можно существенно уменьшить, если окрасить стеклянную колбу лампы в черный цвет (правда, все равно останется вет от катода, но он, к счастью, довольно слабый).

Н. — Это любопытные, но в общем скорее полезные явления, ак как они отводят электроны с сетки, тогда как другие элекроны имеют тенденцию там остаться.

Л. — Но, Незнайкин, электроны остаются на сетке только ри очень малом смещении. При нормальной работе с сетки ухоит значительно больше электронов, чем поступает, и к тому же тот эффект усугубляется приходом на сетку положительных арядов, приносимых ионами.

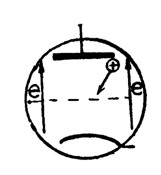


Н. — Откуда появляются ионы? Ведь в электронной лампе осподствует вакуум, иначе говоря пустота.

Л. — В нашем мире ничто, в том числе и вакуум, несовеrенно. В лампе даже при хорошем вакууме остается очень больюе количество молекул газа. Под воздействием электрического оля между катодом и анодом и особенно от ударов электронов олекулы газа ионизируются. В результате появляются положиельные ионы, устремляющиеся к сетке и усиливающие эффект, оздаваемый эмиссией электронов. Я должен сказать тебе, что оздаваемый ионами ток значительно больше тока, возникающего следствие ухода электронов.

Н. — Какое обилие причин возникновения сеточных токов! 1 тем более любопытно, что до сих пор они мне никогда не мешали.

Л. — Надеюсь, ты не думаешь, что сеточный ток расплавит ыводы сетки? В обычной лампе (возьмем в качестве примера ламу с анодным током 4 *ма*) сеточный ток при отрицательном смеtении находится на уровне 0,01 *мка* или еще меньше. На резистое утечки 1 *Мом* (обычно следует ставить еще меньше) падение апряжения составит всего лишь 0,01 *в*, и ты не сможешь его аметить. Но если бы резистор утечки имел величину 100 или 000 *Мом*, то сеточный ток превратился бы в катастрофу.

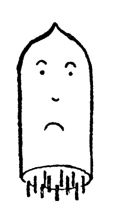


Н. — Что же тогда делать?

Электрометрическая лампа

Л. — Прежде всего мы можем использовать специальные ампы с особо глубоким вакуумом, работающие для снижения онизации с анодным напряжением всего в несколько вольт. В качестве таких ламп часто используют тетроды, но в отличие т обычных ламп роль управляющей сетки выполняет наиболее даленная от катода сетка. Первая отталкивает ионы, потому то на ней создают небольшой положительный потенциал.

Впрочем, когда я говорил «катод», я должен был сказать прямонакальный катод», ибо обычно эти лампы бывают с пря-



мым накалом, благодаря чему удается избежать нагрева сетки. Такова конструкция электрометрических ламп, т. е. ламп, позволяющих производить измерение электрических напряжений без потребления энергии.

Н. — Так вот, наконец, что представляют собой эти знаменитые электрометрические лампы, позволяющие пользоваться резисторами утечки с большим сопротивлением. Каковы их характеристики?

Л. — В некоторых моделях удалось снизить сеточные токи до величины, меньшей чем 10^{-15} *а*, т. е. до одной миллиардной доли микроампера. Но я должен тебе сказать, что прекрасные

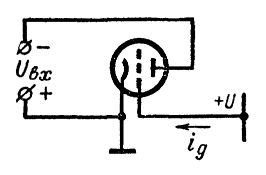
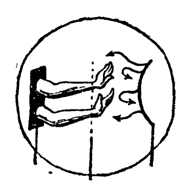


Рис. 46. Обращенный триод. Отрицательный анод отталкивает электроны и таким образом снижает сеточный ток i_g. Это — электрометрическая схема.



результаты можно получить и с обычными лампами, если их несколько меньше нагревать, чтобы снизить температуру сетки, и работать с небольшим анодным током. Таким методом можно легко добиться сеточного тока меньше 10^{-11} *а*. И, наконец, стоит сказать об очень любопытном способе получения высокого входного сопротивления, о методе перевернутого (обращенного) триода.

Н. — Ты ставишь его ножками вверх?

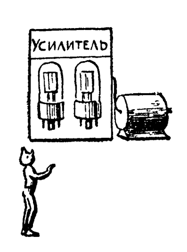
Л. — Нет, я ставлю его в схему, изображенную на рис. 46. Да, я понимаю твой ужас. Управляющее напряжение подводится отрицательным полюсом к аноду, сеточный ток служит выходным, а на сетку подается положительный потенциал $+U$. Чем выше отрицательный потенциал анода, тем больше мешает он электронам попасть на положительную сетку, отражая их к катоду. Положительная сетка мешает ионам достичь анода, последний, будучи холодным, не испускает электронов. Таким образом удается получить псевдотриод с чудовищным входным сопротивлением.



Н. — А его псевдохарактеристики похожи на характеристики обычного хорошего триода?

Л. — Этого только не хватало! Его характеристики похожи на характеристики электрометрического триода, иначе говоря:
— очень маленькая крутизна (в среднем 0,1 *ма/в*);
— малое внутреннее сопротивление (например, 2 *ком*);
— низкий коэффициент усиления (0,2).

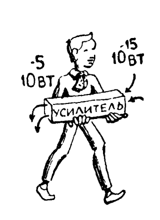
Усиление по напряжению и по току



Н. — Я абсолютно ничего не понимаю! Ты говоришь мне о малом внутреннем сопротивлении, когда требуются чудовищные входные сопротивления. Затем ты говоришь мне о коэффициенте усиления меньше единицы. Что же я должен делать с такой лампой?!

Л. — Сначала я отвечу на твой первый вопрос. Не следует путать входное сопротивление, равное отношению входного напряжения к входному току, с внутренним сопротивлением, равным отношению изменения выходного напряжения к изменению выходного тока. В рассмотренном нами псевдотриоде изменение

сеточного напряжения (выход) на 1 *в* влечет изменение сеточного тока (выходной ток) на 0,5 *ма*, чему соответствует внутреннее сопротивление 2 *ком*. Не смешивай с входным током.



По вопросу же о коэффициенте усиления я с тобой согласен, что входной каскад на такой лампе выработает значительно меньшее напряжение, чем напряжение, поступающее ему на вход. Но важно другое: ты, например, подаешь на вход напряжение 1 *в* при входном токе 10^{-15} *а*, т. е. 10^{-15} *вт*, а на выходе можешь получить напряжение 0,1 *в* при 0,1 *ма* или мощность 10^{-5} *вт*, т. е. мощность на выходе в 10^{10} раз больше, чем на входе. Твое «усиление» в 0,1 раза по напряжению соответствует усилению в десять миллиардов раз по мощности. Тебе этого достаточно?

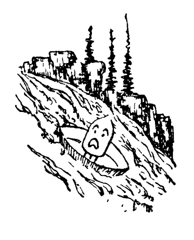
Н. — Я даже могу тебе сказать, что мощность на выходе на 100 *дб* больше, чем на входе.

Л. — О! Но тем не менее правильно!

Н. — Прошу без особых комплиментов, я всегда такой!

Дрейф

Л. — Подожди минутку, дай мне передохнуть от волнения. Ну вот, я почти пришел в себя. Теперь, чтобы закончить с этим вопросом, я скажу тебе, что обычно после электрометрических ламп ставят усилители постоянного тока, основная трудность использования которых связана с явлением дрейфа. Если ты не подаешь на вход никакого напряжения, то анодный ток первой лампы может немного измениться из-за изменения накала, напряжения питания, даже из-за старения самой лампы или изменения температуры окружающей среды. В результате происходит медленное изменение выходного напряжения. Обычно его характеризуют дрейфом, приведенным ко входу, т. е. напряжением, которое необходимо подать на вход, чтобы без каких-либо иных причин вызвать наблюдаемое изменение выходного напряжения.

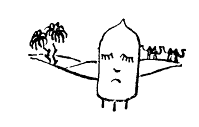


Н. — А сильно ли мешает этот дрейф?

Л. — О, да! И особенно, когда хотят измерить входное напряжение с точностью до милливольта или еще точней (например, в случае измерения pH). Для борьбы с дрейфом пользуются симметричными усилителями.

Н. — Пушпульного типа?

Л. — Довольно похожего. Таким образом удается достаточно хорошо компенсировать дрейф, вызываемый изменением нагрева или напряжения питания, потому что эти изменения одинаково воздействуют на обе лампы каскада, а используется разность их анодных токов. Для получения лучших результатов имеется большое количество усовершенствованных схем, которые ты несомненно увидишь в журнальных статьях. Например, делают усилитель (как с электрометрической, так и с обычной лампой на входе), у которого после 15-минутного прогрева, необходимого для стабилизации режимов, приведенный к входу дрейф меньше 0,1 *мв* за 24 *ч*.



Н. — Ну, так эти знаменитые электрометрические усилители не столь уж сложны: специальная лампа на входе (или обычная, но включенная по специальной схеме)... и дело в шляпе.

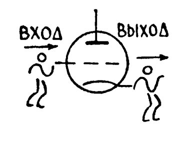
Проблема изоляции

Л. — Верно, сложность не так велика. Но такие схемы при монтаже требуют аккуратности и соответствующих мер предосторожности. Чтобы при напряжении 1 *в* токи утечки не превышали

10^{-15} *а*, требуется изоляция 10^{15} *ом*, а это, позволю тебе заметить, не так легко сделать. Не может быть и речи об использовании в качестве изоляционных материалов бакелита, картона, дерева и других широко применяемых материалов. Требуются кварц, хорошее стекло, плексиглас и некоторые пластмассы (полиэтилен, фторопласт). Особенно непримиримо нужно бороться с влажностью. Часто всю электронную часть помещают в герметизированную коробку, содержащую влагопоглотитель; выводы усилителя выходят из этой коробки через изоляционные бусины. Мне представляется полезным сказать тебе, что коаксиальный кабель с полиэтиленовой изоляцией, если он хорошего качества, обладает достаточной изоляцией для большинства электрометрических измерений. Все другие способы подключения, кроме голого провода, укрепленного на прекрасных изоляторах, следует признать негодными.

А теперь подготовься к эффектному прыжку: с миллиардов мегом на входе до нескольких ом на выходе.

Снижение выходного сопротивления



Н. — Но это «прыжок смерти» или я сам себя не знаю. Как же ты снизишь выходное сопротивление до нескольких ом? С помощью трансформатора?

Л. — В некоторых случаях это возможно, но, как правило, усилители должны иметь такую полосу пропускания, которая исключает использование трансформатора, в особенности, у усилителей постоянного тока. Немного позже ты увидишь, как использование отрицательной обратной связи помогает значительно снизить выходное внутреннее сопротивление усилителя; а пока

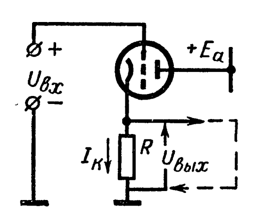
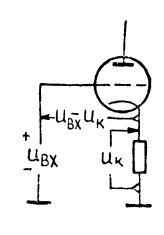


Рис. 47. Катодный повторитель. Результирующее напряжение между сеткой и катодом лампы равно разности входного $U_{вх}$ и выходного напряжений $U_{вых}$.

мы ограничимся лишь одним из способов ее использования, а именно, включением нагрузки в цепь катода или, как иначе называют эту схему, — катодный повторитель.

Н. — О, я достаточно хорошо знаю эту схему в фазосдвигающей системе возбуждения пушпульного каскада. Но я не вижу, как...



Л. — Не торопись, Незнайкин. Речь идет об одном частном случае применения схемы катодного повторителя. Однако изображенная на рис. 47 схема существенно отличается от обычной. Как ты видишь, анод лампы непосредственно соединен с положительным полюсом источника напряжения, между катодом и корпусом включен резистор (с выводов этого резистора я и снимаю выходное напряжение $U_{вых}$).Входное напряжение $U_{вх}$ прикладывается между сеткой и корпусом, создавая на сетке положительное напряжение относительно корпуса и...

Н. — Какой ужас! Положительная сетка!

Л. — Не беспокойся. Сетка действительно положительная относительно корпуса, но катод будет еще более положительным вследствие вызываемого катодным током лампы падения напря-

жения на резисторе R. Следовательно, положительная относительно корпуса сетка будет отрицательной по отношению к катоду, «как это всегда бывает в порядочных домах» (именно так выразился бы один мой приятель).



Н. — Уф, я вновь начинаю дышать. Но скажи мне, пожалуйста, как понять, что катод будет более положительным, чем сетка?

Л. — Нет, только чуть-чуть, в противном случае смещение на лампе оказалось бы чрезмерным и не пропустило бы в резистор R тока, необходимого для создания на катоде потенциала $U_{вых}$ выше, чем $U_{вх}$.

Н. — Кое-что в твоем ответе меня заинтриговало. Если потенциал катода поднимется слишком высоко, смещение лампы окажется очень большим и анодный ток уменьшится, что вызовет снижение потенциала катода. И наоборот, если этот потенциал снизится очень сильно, например ниже $U_{вх}$, то смещение лампы упадет (даже до нуля), а ток лампы вновь повысится и повысит потенциал катода. Ведь тогда схема должна генерировать, разве не так?

Катодный повторитель

Л. — Ни коим образом. Вспомни принцип работы гетеродина: колебания возникают потому, что контур через цепь обратной связи так воздействует на себя, что любое возмущение имеет тенденцию усилиться (например, увеличение анодного тока делает сетку положительной). Здесь же все наоборот. Обратная связь у нас не положительная (как в гетеродине), а отрицательная, и генерации колебаний поэтому не происходит.

Но твоя реплика показала мне, что ты очень легко поймешь, какой интерес представляет эта схема. А чтобы тебе было легче

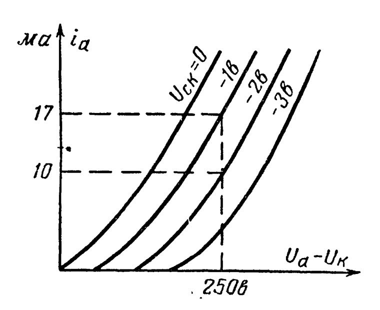
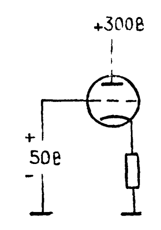


Рис. 48. Это семейство кривых позволяет найти рабочую точку лампы в режиме катодного повторителя.

рассуждать, возьмем конкретный пример: лампа 12 АТ7 (крутизна 7 *ма/в*); анодное напряжение + 300 *в*, $U_{вх}$ = 50 *в* и R = 5 *ком*.

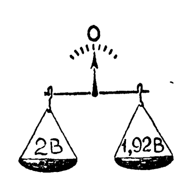


Если $U_{вых}$ будет близко к 50 *в*, то проходящий по резистору R ток будет близок к 10 *ма*, а напряжение анод — катод будет около 250 *в*. Возьми семейство анодных характеристик лампы (рис. 48) и скажи мне, каким должно быть смещение, чтобы пропустить ток около 10 *ма* при напряжении на аноде 250 *в*?

Н. — Подожди минутку, вот, нашел — ровно — 2 *в*.

Л. — Следовательно, наше напряжение $U_{вых}$ будет 50*в* + + 2 *в* = 52 *в* и...

Н. — Но этого не может быть, Любознайкин; если на катоде будет 52 *в*, то тогда, во-первых, напряжение анод — катод было бы не 250 *в*, а 248 *в*, а, во-вторых, катодный ток был бы не 10 *ма*, а 52 *в* : 5 *ком* = 10,4 *ма*!



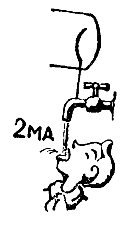
Л. — Если рассуждать со всей строгостью, ты, Незнайкин, прав. Вооружившись этими уточненными значениями, ты можешь еще раз заглянуть в семейство характеристик и посмотреть, какое напряжение смещения соответствует анодному току 10,4 *ма* при напряжении анод — катод 248 *в*; если взять точные цифры, то смещение будет 1,92 *в* вместо 2 *в*. Разница столь мала, что в дальнейшем в подобном уточнении значений нет надобности. Ты, надеюсь, не станешь придираться ко мне из-за одной десятой вольта?

Н. — Хорошо. Но что ты будешь делать с этими 51,92 *в* на выходе (чтобы доставить тебе удовольствие, скажу 52 *в*)?

Л. — Следи повнимательнее за моими рассуждениями. Предположим, что от этого источника 52 *в* я хочу потребить ток 2 *ма*. Что произойдет?

Н. — Я предполагаю, что выходное напряжение $U_{вых}$ снизится, как напряжение любого источника, ток которого я потребляю.

Л. — Совершенно верно. А теперь меня интересует, насколько понизится это напряжение? Падение напряжения, обозначенное $U_{пад}$ (иначе говоря, $U_{вых}$), соответствующее отсутствию потребления, равно 52 *в*, снижается до (52 *в* — $U_{пад}$), когда в цепочку, обозначенную на рис. 47 пунктиром, будет ответвляться ток 2 *ма*. Откуда поступают эти 2 *ма*?



Н. — Конечно из лампы.

Л. — Да, в значительной части. Раз потенциал катода снизился на $U_{пад}$, то соответственно снизилось и смещение. Позволю себе напомнить тебе, что крутизна лампы 7 *ма/в*. Следовательно, анодный ток увеличится на: $S \times U_{пад}$ (крутизна лампы $S =$ $= 0{,}007$ *а/в*).

Но ток в обозначенную пунктиром цепочку пойдет не только из этого источника. В самом деле, анодный ток лампы, несомненно, увеличился, но ток в R уменьшился, ибо $U_{вых}$ снизилось: этот ток уже не 52 *в*$/R$, а (52 *в* — $U_{пад}$) $/R$, иначе говоря, проходящий по резистору R ток уменьшился на $U_{пад}/R$ и этот ток тоже войдет составной частью в ток $I = 2$ *ма*, который я потребляю в нагрузке каскада. Следовательно, мы будем иметь:

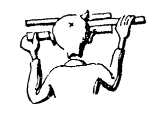
$$I = SU_{пад} + \frac{U_{пад}}{R},$$

подставив наши значения получим:

$$0{,}002 = 0{,}007U_{пад} + \frac{U_{пад}}{5000} \text{ или } 2 = 7U_{пад} + \frac{U_{пад}}{5} = 6{,}2U_{пад},$$

$$\text{откуда } U_{пад} = 2 : 7{,}5 = 0{,}28 \text{ в}.$$

Н. — Но это совсем мало!



Л. — Этим-то и интересна схема: она может выдавать ток на выходе без ощутимого снижения напряжения, иначе говоря, у нее низкое выходное внутреннее сопротивление.

Н. — А какова величина этого сопротивления?

Л. — Ее очень просто рассчитать. Если ты потребляешь ток I от источника, то падение напряжения на его клеммах составит:

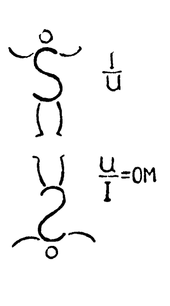
$$U = r_{вн}I,$$

где $r_{вн}$—внутреннее сопротивление источника. Следовательно, $r_{вн} = U/I$ или в нашем случае 0,28 *в* : 0,002 *а* = 140 *ом*.

Обычно лучше пользоваться формулой $I = SU_{пад} + \frac{U_{пад}}{R}$, что при делении обеих частей уравнения на $U_{пад}$ дает $\frac{I}{U_{пад}} =$

$= S + \frac{1}{R}$, но левая часть равенства $\frac{I}{U_{пад}} = \frac{1}{r_{вн}}$, а правую часть я могу записать в следующем виде $\frac{1}{1/S} + \frac{1}{R}$. Таким образом,

$$\frac{1}{r_{вн}} = \frac{1}{1/S} + \frac{1}{R}.$$



Как видишь, внутреннее сопротивление катодного повторителя эквивалентно параллельно соединенным R и $1/S$.

Н. — Довольно необычно рассматривать $1/S$ как сопротивление!

Л. — Не очень. Ведь S — крутизна, и, следовательно, она выражается в амперах на вольт (вернее в миллиамперах на вольт). А значит обратная ей величина $1/S$ выражается в вольтах на ампер, а что мы получим, разделив вольты на амперы? Просто-напросто омы. Например, в рассмотренном нами случае $S = 7$ *ма/в*, следовательно, $1/S = 1 : 0{,}007 = 143$ *ом*; как ты сам понимаешь, при параллельном включении резистора $R = 5$ *ком* он не оказывает сколько-нибудь заметного влияния, так как его сопротивление в 35 раз больше сопротивления другой ветви.

Как ты видишь, Незнайкин, наша схема катодного повторителя имеет внутреннее выходное сопротивление 140 *ом*, тогда как каскад обычного типа, например с анодной нагрузкой 20 *ком*, имел бы внутреннее выходное сопротивление от 5 до 10 *ком*, так как нужно учитывать внутреннее сопротивление лампы, которое при расчете выходного сопротивления должно рассматриваться включенным параллельно с сопротивлением анодной нагрузки.

Достоинства низкого выходного сопротивления

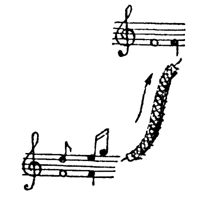
Н. — Твои доводы я понял. Но я хочу задать один вопрос, который тебе, несомненно, покажется глупым: что ты выиграл от снижения выходного сопротивления своего каскада?

Л. — В твоем вопросе абсолютно нет ничего глупого. Я вновь все объясню, но скажи мне, пожалуйста, Незнайкин, зачем нужно тебе выходное напряжение?

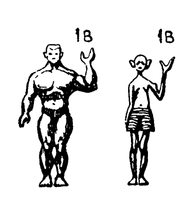
Н. — Хм... да чтобы использовать его!

Л. — Совершенно верно. Однако «использовать» напряжение означает получать с его помощью ток. Если у источника напряжения (на выходе твоего усилителя) низкое внутреннее сопротивление, ты можешь забрать у него значительный ток без снижения напряжения.

Выходное напряжение, вырабатываемое источником с низким внутренним сопротивлением, мало чувствительно к различным помехам как внешним, так и вызываемым изменением тока в цепи, подключенной к источнику. Так, например, в моей установке высококачественного воспроизведения звука насчитывается семь каскадов, собранных по схеме катодного повторителя. Один такой каскад установлен на самом выходе моего ЧМ-приемника; напряжение звуковой частоты (не более 1 *в*) поступает с источника, внутреннее сопротивление которого всего лишь 140 *ом* (а без этого каскада оно было бы не менее 10 *ком*). В этих условиях я могу позволить себе передавать низкочастотный сигнал по длинным проводам, например, к установленному на другой стороне дополнительному громкоговорителю. Их можно прокладывать рядом с трансформаторами питания, ибо провода, по которым идет низкочастотный сигнал, не «ухватят» никаких помех от сети 50 *гц*. Если бы, например, я захотел передать этот сигнал на сот-

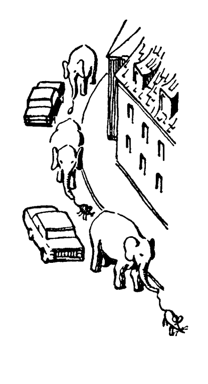


ню метров по экранированному проводу, то емкость провода из-за экрана составила бы около 10 000 *пф*. А для самых высоких передаваемых частот (максимальная интересующая нас частота 20 *кгц*) реактивное сопротивление этого провода составляет около 800 *ом*. Для сигнала, поступающего от источника с внутренним сопротивлением 10 *ком*, эти 800 *ом* явились бы почти коротким замыканием, что привело бы к полной потере всех высоких частот и сильному искажению воспроизводимого звука. При моем же каскаде — катодном повторителе с его внутренним сопротивлением 140 *ом* эти 800 *ом* — можно просто не принимать во внимание: они внесут некоторый сдвиг фазы, но не вызовут никакого ощутимого ослабления звука.



Н. — Да, но скажи мне... ведь твой каскад с катодной связью напряжения не усиливает?

Л. — Ты прав. Каскад с катодной связью не дает никакого усиления по напряжению (коэффициент усиления даже немного меньше единицы), но «переписывает» входное напряжение, получаемое от генератора с очень большим внутренним сопротивлением, не способным давать большой ток; в результате мы получаем выходное напряжение, «обросшее мышцами», т. е. равное или почти равное входному напряжению, но в отличие от него способное давать значительный ток без ущерба для себя. Выходное напряжение стало «невозмутимым» — оно мало подвержено влиянию помех.



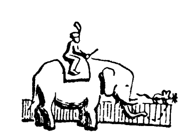
Биологическая аналогия

Н. — Совсем как мышь, ведущая слона на поводке!

Л. — Конечно, это очень модно! Только что в Булонском лесу я видел трех таких мышей, гуляющих со своими слонами!

Н. — Ты напрасно смеешься надо мной. Дай мне закончить, Любознайкин. Я вспомнил один цирковой номер, который мне однажды довелось видеть. Мышь бежала по бортику манежа и тащила тончайший поводок, завязанный на шее слона. А слон шел за мышью и старался удерживать без изменения натяжение поводка: шел быстрее, когда поводок натягивался, и замедлял шаг, если он провисал. Слон шел с такой же скоростью, что и мышь, но он даже не почувствовал бы препятствия, которое остановило бы его поводыря. Зрителям же казалось, что мышь тащит толстокожего ленивца, и они хохотали до упаду.

Л. — Я подозреваю, что эта история придумана тобою для пользы дела... Во всяком случае она показывает, что благодаря «слону-повторителю», ты хорошо понял принцип катодного повторителя.



Схемы на транзисторах

Н. — Это схема, которую можно сделать только на лампах — транзисторы здесь не годятся, потому что у них нет катода.

Л. — Нет, но у них есть эмиттер, выполняющий роль катода, и довольно часто делают схему с общим коллектором (рис. 49), которую также называют «эмиттерным повторителем». Я нарисовал схему для транзистора *р-п-р*. Для транзистора *п-р-п* нужно поменять напряжения на обратные, и мы получим схему, более похожую на ламповую.

Н. — Значит, по своим параметрам эта схема строго идентична схеме, приведенной на рис. 47?

Л. — Нет, только аналогична. В изображенной на рис. 47 схеме сетку обычно делают отрицательной относительно катода.

Следовательно, никакого сеточного тока нет и возможное внутреннее сопротивление источника, дающего входное напряжение $U_{вх}$, не учитывается.

В транзисторе имеется ток базы; он в β раз меньше тока коллектора (с приемлемой точностью можно сказать, что он также в β раз меньше тока эмиттера, так как последний очень близок к току коллектора). Если изменять ток эмиттера, то будет изменяться и ток базы; изменения последнего, естественно, будут в β

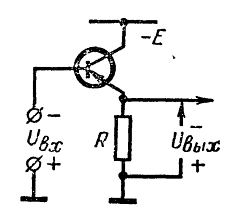


Рис. 49. Каскад с нагрузкой в цепи эмиттера (схема с общим коллектором или эмиттерный повторитель) — транзисторный эквивалент ламповой схемы катодного повторителя.

раз меньше. Если дающий напряжение U источник имеет внутреннее сопротивление, то получаемый от него ток может вызвать изменение напряжения U. Следовательно, в эмиттерном повторителе выходное сопротивление зависит от выходного сопротивления источника, подающего в схему сигнал.

Можно сказать, что выходное сопротивление изображенной на рис. 49 схемы равно обратной величине крутизны транзистора (крутизна транзистора представляет собой частное от деления усиления по току на его выходное сопротивление при включении по схеме с общим эмиттером), увеличенной на частное от деления его усиления по току β на выходное сопротивление генератора, вырабатывающего напряжение U.

Н. — Вот это да! Как это сложно!

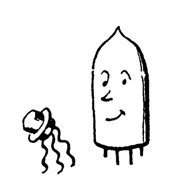
Пример эмиттерного повторителя

Л. — Совсем нет. И ты в этом сейчас убедишься на конкретном примере с числовыми значениями. Предположим, что сопротивление транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, равно 1 *ком*, а усиление по току $\beta = 60$. Следовательно, крутизна этого транзистора равна 60 : 1 000 или 60 *ма/в*. Если напряжение U подается от источника с низким выходным сопротивлением, то при изменении тока базы оно не будет изменяться. Выходное сопротивление, как и в ламповой схеме, будет величиной обратной крутизне, т. е. 16,7 *ом* (я не учитываю сопротивление резистора R, которое следует рассматривать как включенное параллельно этому сопротивлению 16,7 *ом*).

Но если выходное сопротивление источника, дающего напряжение U, равно 2 *ком*, то на каждый израсходованный на эмиттере миллиампер расход на базе составит 1/60 *ма*, вследствие чего напряжение U снизится на

$$2\,000 \cdot \frac{1}{60\,000} = \frac{1}{30}\ в.$$

Это отразится на выходе (усиление по напряжению почти равно единице), и выходное сопротивление увеличится на $\frac{1/30}{0{,}001} =$ $= 33$ *ом* (напряжение снижается на 1/30 *в* на каждый потребленный миллиампер).



Следовательно, выходное сопротивление будет:

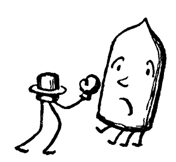
$$16{,}7\ \textit{ом} + 38\ \textit{ом} \approx 50\ \textit{ом}.$$

Н. — Значит, в схеме эмиттерного повторителя выходное сопротивление зависит от выходного сопротивления!

Л. — Схема эмиттерного повторителя значительно уменьшает эту зависимость, но не устраняет ее полностью как катодный повторитель.

Н. — Ну вот, видишь, транзисторы значительно уступают лампам.

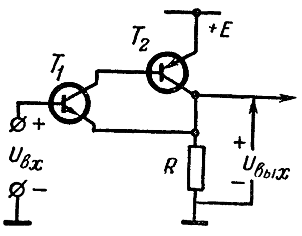
Суперэмиттерный повторитель



Л. — Незнайкин!.. Если ты еще раз скажешь такую безобразную нелепость, я выставлю тебя за дверь и не покажу тебе транзисторной схемы «суперэмиттерного повторителя», не имеющего себе равного на лампах.

Н. — Как она устроена?

Л. — Схему я нарисовал тебе на рис. 50, а на рис. 51 схематически изобразил двухкаскадный усилитель, изучение которого



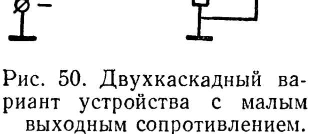


Рис. 50. Двухкаскадный вариант устройства с малым выходным сопротивлением.

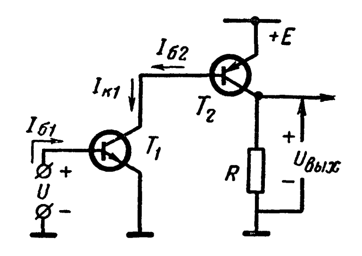
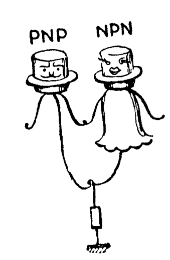


Рис. 51. Двухкаскадный усилитель с большим коэффициентом усиления.

поможет тебе понять схему на рис. 50. Ты видишь, что на схеме рис. 51 ток базы транзистора T_1 (транзистор типа *n-p-n*) направлен от источника напряжения U; его величина $I_{б1}$. Ток коллектора $I_{к1}$ транзистора T_1 идет в обратном направлении (оно показано стрелкой и соответствует условному направлению движения тока); следовательно, его можно взять непосредственно с базы транзистора T_2 ($I_{к1} = I_{б2}$) (транзистор типа *p-n-p*). Ток коллектора $I_{к2}$ транзистора T_2 проходит по резистору R и создает выходное напряжение $U_{вых}$.



Н. — Должен признаться, что меня соблазняет простота схемы — один резистор на целых два транзистора!

Л. — Изображенная на рис. 51 схема дает очень большое усиление по напряжению. Коэффициент усиления легко подсчитать по формуле

$$k = S_1 \beta_2 R,$$

где S_1 — крутизна характеристики транзистора T_1, β_2 — усиление по току транзистора T_2.

Например, при $S_1 = 12$ *ма/в*, $\beta_2 = 50$ и $R = 500$ *ом* коэффициент усиления по напряжению составит 300.

Если мы вычтем из напряжения U все выходное напряжение $U_{вых}$, чтобы приложить между эмиттером и базой транзистора

T_1 только напряжение $U' = U - U_{вых}$, то получим усилитель с коэффициентом отрицательной обратной связи (мы к этому вернемся), равным 300; схема такого усилителя показана на рис. 50.

Входное сопротивление усилителя приближается к мегому (чудовищная величина для классических транзисторных схем), а выходное сопротивление меньше 1,5 *ом*, коэффициент передачи по напряжению достигает 0,997 (в лучших каскадах, собранных по схеме катодного повторителя, с трудом удается поднять этот показатель до 0,95).

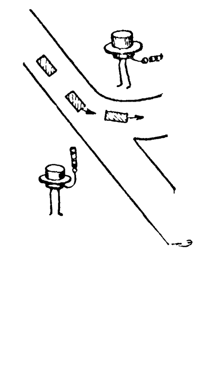
Н. — В самом деле очень соблазнительно, однако эта история для меня не очень ясна. Почему раньше не сделали ее эквивалента в схемах на лампах?

Л. — Незнайкин, найди мне «лампу *p-n-p*», и я покажу тебе такую схему, но боюсь, что тебе придется очень долго искать. По правде говоря, на лампах можно сделать одну очень сложную схему, основанную на этом же принципе, и которая тоже дает интересные результаты.

Н. — Значит изображенная на рис. 50 схема называется «суперэмиттерный повторитель»?

Л. — Честно говоря, это название дал схеме я сам. Впрочем оно малоизвестно, и я подумываю, не дать ли ей новое и более выразительное название.

Если хотят изменить полярность



Н. — Но мне кажется, что все эти «суперэмиттерные повторители» наделены одним общим недостатком: их выходное напряжение может устанавливаться только в одном направлении; иначе говоря, его нельзя сделать положительным или отрицательным, как нельзя изменить и направление тока, который это напряжение может дать (ведь нельзя же изменить направление тока в лампе или в транзисторе).

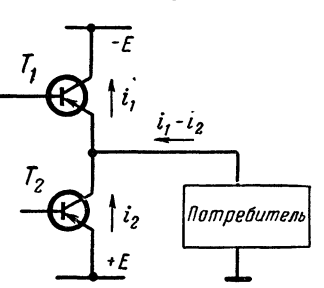
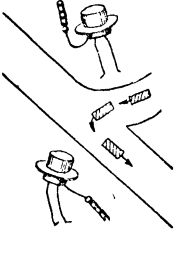


Рис. 52. Последовательный пушпульный каскад. В нагрузку поступает разность токов двух транзисторов.

Л. — Абсолютно верно, Незнайкин. Следует сказать, что во многих случаях приходится иметь дело с напряжениями, всегда имеющими одну полярность. Если ты пожелаешь сделать лучше, можно использовать «последовательную пушпульную схему». Я не стану описывать эту систему (схему) во всех подробностях, а объясню лишь ее принцип.

Два транзистора включаются последовательно (рис. 52): на коллектор транзистора T_1 подается напряжение питания $-E$, а на эмиттер транзистора T_2 — напряжение $+E$.

Со специального фазовращателя на базы подаются соответствующие токи так, чтобы, например, сумма токов коллекторов транзисторов T_1 и T_2 оставалась постоянной. Разность этих токов $I_1 - I_2$ проходит через нагрузку, создает напряжение $U_{вых}$. Эта разность может быть как положительной, так и отрицательной.



Н. — Очень ловко придумано. А разве нельзя сделать аналогичное устройство на лампах?

Транзистор-пентод (без экранных сеток)

Л. — Можно, но не так легко. Чтобы лампы работали с хорошей отдачей, рекомендуется использовать пентоды, но возникают проблемы питания цепей экранных сеток. В схеме на транзисторах удается получить еще более низкие выходные сопротивления: при желании можно получить несколько ампер при низком напряжении. Я использовал эту схему для изменения направления вращения ротора маленького двигателя, установленного на управляемой по радио модели корабля. Эту же схему я использовал в своей установке высококачественного воспроизведения звука и получил нужную мощность, которая без выходного трансформатора подается непосредственно на 15-омный громкоговоритель. Если бы ты знал, как я был доволен, когда мне удалось убрать из схемы трансформаторы. Ведь они стоят ужасно дорого, весят много и занимают много места, не говоря уже о вносимых ими искажениях.

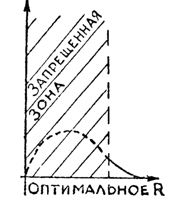


Выходное сопротивление и оптимальная нагрузка

Н. — Мы заканчиваем рассмотрение систем, снижающих выходное сопротивление, и я хотел бы задать тебе вопрос. Если выходное сопротивление каскада снизили, например, до одного ома, нужно ли нагрузить его одним омом, т. е. сделать так, чтобы он отдавал свою мощность в нагрузку с сопротивлением 1 *ом*. Вероятно, сделать такие низкоомные нагрузки трудно?

Л. — Незнайкин, ты меня радуешь. Ты в очень четких выражениях сформулировал ошибочное представление, сложившееся у многих радистов.

Твое замечание порождено следующим рассуждением: если от генератора с внутренним сопротивлением $r_{вн}$ хотят получить максимально возможную мощность, то к нему нужно подключить внешнюю нагрузку с точно таким же сопротивлением. Но очень часто случается так, что применить нагрузку $R_н = r_{вн}$ невозможно — генератор ее не выдерживает. Так, например, батарея с электродвижущей силой 4 *в* и внутренним сопротивлением 10 *ом* отдает наибольшую мощность, если к ней подключают лампу, которая в нагретом состоянии имеет сопротивление 10 *ом*. Напряжение на клеммах батареи упадет до 2 *в*, по цепи пойдет ток 0,2 *а* и потребляемая лампой мощность составит 0,4 *вт*. При подключении другой лампы с сопротивлением меньше или больше 10 *ом* отдаваемая батареей мощность будет меньше 0,4 *вт*.



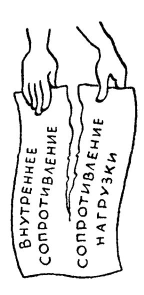
Но рассмотрим случай с аккумуляторной батареей — ее э. д. с. 6 *в*, а внутреннее сопротивление 0,03 *ом* (наиболее распространенные значения). Ты не можешь подключить нагрузку с сопротивлением 0,03 *ом*, так как в этом случае ток должен был бы достичь 100 *а* (напряжение на клеммах равнялось бы 3 *в*), а батарея этого не выдержит.

Ты подключишь, например, нагрузку 1 *ом*, которая потребует 6 *а*, а это вполне нормальный ток для аккумуляторной батареи.

Н. — Иначе говоря, в этом случае сопротивление оптимальной нагрузки не равно внутреннему сопротивлению: нагрузка определяется напряжением батареи и максимальным током, который она может дать.

Л. — Абсолютно верно. Ты усвоил принцип, и я могу уточнить некоторые моменты. Так, например, если усилитель, снабженный снижающим выходное сопротивление каскадом, имеет

выходное внутреннее сопротивление 1 *ом* (или меньше), то на каждый отданный в нагрузку ампер выходное напряжение снизится на 1 *в* (или меньше). Но этот усилитель может быть рассчитан на работу с большим нагрузочным сопротивлением. Например, если его выходное напряжение 15 *в*, а максимальный допустимый ток 2 *а*, то для получения максимальной мощности, т. е. тока 2 *а* при напряжении 15 *в* требуется нагрузка с сопротивлением 7,5 *ом*.



А когда на сцену выходит отрицательная обратная связь (особенно в каскадах, собранных по схеме катодного эмиттерного повторителя), нужно четко разделять:

выходное сопротивление, представляющее собой частное от деления изменения напряжения, вызываемого потреблением энергии, на изменение выходного тока;

оптимальное сопротивление нагрузки, которое обычно значительно превышает выходное сопротивление и определяется путем деления выходного напряжения на максимально допустимый выходной ток.

Н. — Понял, но должен признаться, что мое собственное внутреннее сопротивление несколько минут тому назад резко повысилось, и я предлагаю перенести продолжение нашей беседы на следующий раз.

Беседа седьмая

Незнайкин чрезвычайно обеспокоен: он привык к технике низких частот, где необходимо сохранять форму сигнала, и теперь, наблюдая, как Любознайкин систематически деформирует сигнал, он пришел в полное замешательство. Незнайкин начинает усваивать, что такое ограничение сигнала сверху, как превращают медленное изменение напряжения в скачкообразное, затем он постигает тайны дифференцирующих и интегрирующих схем. Наступает неизбежное (вопреки его желанию и общеизвестному ужасу перед математикой) — его заставляют проглотить определение (упрощенное!) производных и интегралов... и он понимает, что это значительно проще, чем обычно думают.

Сигналы прямоугольной формы. Ограничение. Дифференцирование и интегрирование

Незнайкин — Дорогой Любознайкин, прошлый раз я забыл задать тебе один вопрос. Скажи, пожалуйста, насколько верно воспроизводят сигналы различные «суперусилители», о которых ты мне рассказывал?

Любознайкин — Точность воспроизведения прекрасная у всех систем, собранных по схеме катодного или эмиттерного повторителя и, особенно, у «суперэмиттерного повторителя» на двух взаимно дополняющих транзисторах, так как эта схема характеризуется глубокой отрицательной обратной связью. Само собой разумеется, что ты можешь осуществить эту верность воспроизведения лишь в том случае, если не перегрузишь схему, т. е. не заставишь ее давать на выходе наибольший ток или наибольшее напряжение, но в промышленной электронике во многих случаях линейность не является основным требованием, предъявляемым к усилителю, иногда даже наоборот...

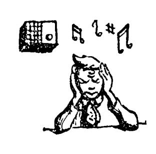


Умышленно вносимые искажения

Н. — Вот как! Так значит сигнал деформируют, полагаясь на волю случая или в силу извращенности?

Л. — Да, сигнал деформируют, но не по воле случая. Что же касается извращенности, то ты можешь и, вероятно, предложишь мне основать АЗСОПД (Ассоциацию Защитников Сигналов От Порочного Деформирования).

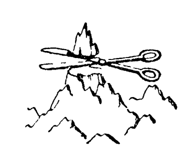
Н. — Надеюсь, что ты вступишь в эту ассоциацию. Но как могут деформированные сигналы создавать неискаженный звук?



Л. — На этот раз выбрось из головы свои идеи о звукофикации и музыкальности. Воспроизведение звука — одна из сфер приложения радиоэлектроники, но она ни коим образом не исчерпывает всей радиоэлектроники, точно так же, как и электричество служит не только для питания электроплиток. Напряжение с выхода твоего усилителя может приводить в действие не только

громкоговоритель. И, если ты хочешь, чтобы оно, например, включало реле, разве напряжение обязательно должно быть синусоидальным?

Н. — Согласен. А каким деформациям ты подвергнешь сигнал?



Л. — Мы начнем с ограничения сигнала сверху, так как этот практичный метод позволяет уравнять величину сигналов с различной амплитудой. Такую задачу можно успешно решить путем использования простого диода. Как ты видишь, изображенная на рис. 53 схема пропустит на выход только положительную часть входного сигнала $U_{вх}$.

Н. — Это понять легко. Но для чего понадобился здесь резистор *R*?

Л. — Его роль не так очевидна. Представь себе, что на выход подключают какую-нибудь нагрузку, использующую напряже-

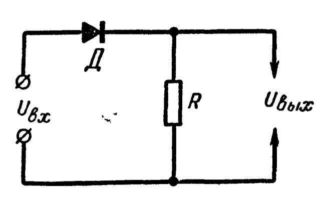


Рис. 53. Ограничитель. На выход проходит только положительная часть поступающего на вход напряжения.

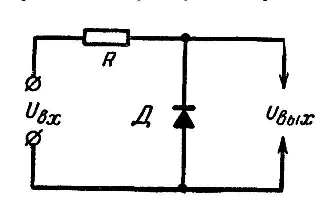
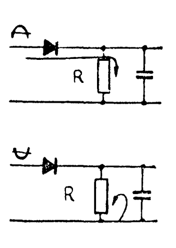


Рис. 54. Ограничитель с параллельно включенным диодом, замыкающим накоротко цепь для отрицательной части входного напряжения.

ние $U_{вых}$ и обладающую большим сопротивлением для постоянного тока и существенной емкостью. При возрастании $U_{вх}$ напряжение $U_{вых}$ будет также возрастать, при этом паразитная емкость зарядится через диод *Д*, но выходное напряжение не сможет следовать за входным, если последнее резко снизится (даже, если оно и останется при этом положительным), так как паразитная емкость не успеет разрядиться. Включив параллельно названной емкости резистор *R*, я устранил описанную неприятность.

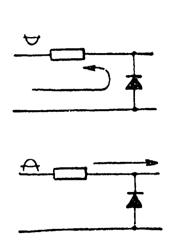


Н. — Но, чтобы хорошо разрядить паразитные емкости, тебе, вероятно, целесообразно взять *R* с очень небольшим сопротивлением?

Л. — С одной стороны, да, но не следует забывать, что входное напряжение $U_{вх}$ во время положительных полупериодов должно создавать ток в резисторе *R*, включенном параллельно выходу. Следовательно, нужно сделать так, чтобы потребление тока резистором *R* не слишком перегружало источники $U_{вх}$.

Н. — А что произойдет, если изменить полярность диода *Д*?

Л. — Тогда схема будет срезать положительные части сигнала, и на выход будут поступать только отрицательные части входного сигнала $U_{вх}$. А теперь я покажу тебе другой амплитудный ограничитель. По своим характеристикам он уступает уже описанному, но иногда его все же приходится использовать; схема этого ограничителя приведена на рис. 54. Ты легко поймешь, как он работает. Во время положительных полупериодов входного сигнала $U_{вх}$ диод *Д* заперт и напряжение $U_{вх}$ поступает на выход (через резистор *R*). Во время отрицательных полупериодов сигнала $U_{вх}$ диод *Д* открыт и играет роль короткозамыкателя — напряжения на выходе нет. В принципе резистор *R* и диод *Д* работают как делитель напряжения, один элемент которого (*Д*) мо-



жет иметь бесконечно большое или равное нулю сопротивление [1].

Н. — Это объяснение очевидно относится и к первой схеме. За исключением перемены мест диода и резистора схемы идентичны, и я не понимаю, почему второй ограничитель кажется тебе хуже первого.

Л. — Сейчас ты это увидишь. В схеме на рис. 53 во время положительных полупериодов сигнала $U_{вх}$ (а меня интересуют только эти полупериоды, потому что отрицательные срезаются) источник $U_{вх}$ подключается практически непосредственно на выход, так как ток проходит по диоду *Д*, обладающему малым сопротивлением. А в схеме на рис. 54 во время положительных полупериодов сигнала $U_{вх}$ между входом и выходом находится резистор *R*. Все происходит так, как если бы увеличилось внутреннее сопротивление источника $U_{вх}$, а я тебе уже объяснил, насколько вредно повышение внутреннего сопротивления источника — оно может исказить форму сигналов.

Верная деформация

Н. — Теперь я тебя совсем не понимаю! Только что, срезав все отрицательные полупериоды, ты сам ужасно деформировал сигнал, а теперь кажется боишься какой-то другой деформации?

Л. — Как ты говоришь, я «ужасно» деформировал сигнал, но это мне было нужно, чтобы, например, убрать отрицательные полупериоды. Это не означает, что мне обязательно требуется изменить также и форму положительных полупериодов: они могут являться необходимыми мне положительными синхронизирующими импульсами. Именно поэтому я сожалею о наличии в схеме на рис. 54 последовательно включенного резистора *R*. Я не могу сильно уменьшить сопротивление резистора *R*, так как для хорошего срезания отрицательных полупериодов оно должно быть большим по сравнению с динамическим сопротивлением диода.

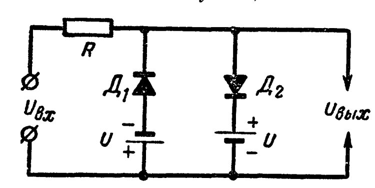


Рис. 55. Двухуровневый ограничитель, выходное напряжение равно входному, когда последнее находится в пределах от $+U$ до $-U$.

Н. — Должно быть это несложно, ведь проводящий диод накоротко замыкает цепь.

Л. — Это было бы слишком хорошо! Даже у самых хороших полупроводниковых диодов внутреннее динамическое сопротивление практически не бывает меньше 50 или даже 100 *ом*. А вакуумный диод с динамическим сопротивлением меньше 300 *ом* большая редкость. Я показал схему для того, чтобы позволить тебе сделать двухуровневый ограничитель. Взгляни на схему рис. 55. Как ты видишь, входное напряжение проходит на выход только в том случае, если оно больше $-U$ и меньше $+U$. Напряжения порога ограничения U подаются на диоды, например, от двух

---

[1] Точнее говоря, в прямом направлении диод обладает хотя малым, но вполне определенным конечным сопротивлением, и в силу этого не является идеальным «замыкателем». См. следующий раздел данной беседы (прим. ред.).

маленьких батарей. Если входное напряжение $U_{вх}$ поднимается выше $+U$, то диод $Д_2$ проводит ток и напряжение на выходе равно $+U$. Если входное напряжение опускается ниже $-U$, то ток пропускает диод $Д_1$ и напряжение на выходе равно $-U$.

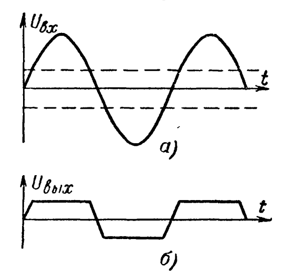


Рис. 56. Подавая синусоиду (*а*) на вход схемы, изображенной на рис. 55, на выходе получают синусоиду со срезанными верхушками (*б*).

Н. — Тогда, подав на вход синусоидальное напряжение (рис. 56, *а*), на выходе получим странную штуку, изображенную на рис. 56, *б*?

Получение сигналов прямоугольной формы

Л. — Правильно. Ты очень хорошо нарисовал выходной сигнал — фронты сигнала не отвесные (отвесными они могут быть только в том случае, если амплитуда $U_{вх}$ очень велика по сравнению с U). Поэтому, когда требуются сигналы более приближающиеся к прямоугольной форме (как показано на рис. 57), часто

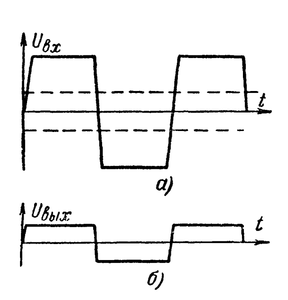


Рис. 57. Ограниченная синусоида (рис. 56, *б*) усиливается (*а*), а затем вновь подвергается ограничению (*б*). В результате получается колебание, по своей форме близкое к прямоугольным сигналам.

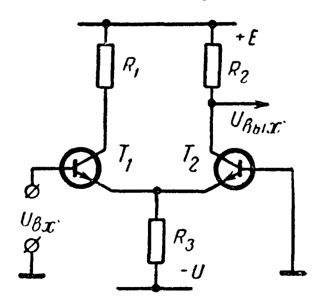


Рис. 58. Усилитель-ограничитель на двух транзисторах с эмиттерной связью: когда напряжение на входе положительное, запирается транзистор T_2, когда отрицательное — запирается транзистор T_1.

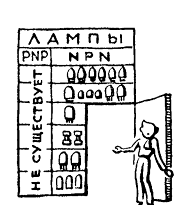
приходится вновь усиливать и затем еще раз ограничивать сигнал, полученный после первого ограничения.

Н. — Мне в голову пришла гениальная идея! Если сигнал нужно усиливать и ограничивать, то нельзя ли обе операции выполнить одновременно? Я вспоминаю, что перегруженный усилитель имеет тенденцию срезать верхушки сигналов.

Л. — Совершенно верно. Именно так часто осуществляют ограничение сигналов. Очень хорошо справляется с такой задачей усилитель, схему которого я для тебя нарисовал на рис. 58.

Н. — Почему ты поставил транзисторы *n-p-n*?

Л. — Потому что легче рассуждать, когда имеешь дело с положительными напряжениями. Кроме того, эту схему без изменений можно сделать на лампах (замену номиналов резисторов вряд ли следует считать изменением схемы). И, наконец, по той причине, что все шире используемые кремниевые транзисторы на 80% относятся к типу *n-p-n*. Итак, перейдем к анализу схемы. Когда $U_{вх}$ становится положительным, ток проводит транзистор T_1, потенциалы эмиттеров повышаются и транзистор T_2 запирается. Когда $U_{вх}$ становится отрицательным, ток проводит транзистор T_2, потенциалы эмиттеров становятся близкими к нулю и запирается транзистор T_1. Я подал на общий для эмиттеров резистор R_3 отрицательный потенциал, чтобы по R_3 протекал определенный ток даже в том случае, когда потенциал эмиттеров близок к потенциалу корпуса. На рис. 59 я вычертил кривую зависимости потенциала коллектора транзистора T_2 ($U_{к2}$) от потенциала базы транзистора T_1 ($U_{б1}$).



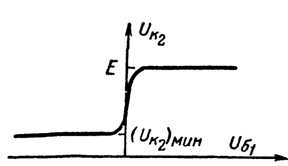


Рис. 59. Кривая изменения напряжения на коллекторе транзистора T_2 в схеме на рис. 58 в зависимости от напряжения $U_{б1}$ характеризует эффективность ограничения.

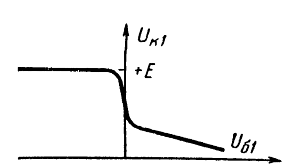
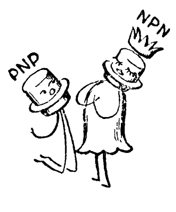
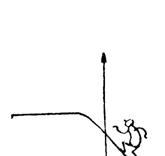


Рис. 60. При использовании напряжения коллектора транзистора T_1 в качестве выходного напряжения схема хуже осуществляет ограничение сигналов, так как при положительном напряжении $U_{вх}$ транзистор T_1 остается не запертым.

Н. — Да, я вижу. Когда напряжение $U_{вх}$ положительно, транзистор T_2 заперт, а потенциал его коллектора $U_{к2}$ равен $+E$. Но как найти величину его потенциала $(U_{к2})_{мин}$, когда $U_{вх}$имеет отрицательный знак, иначе говоря, когда транзистор T_1 заперт?



Л. — Элементарно просто, дорогой доктор Уотсон,.. прости,.. Незнайкин! Если транзистор T_2 пропускает ток, то можно считать потенциал его базы равным потенциалу его эмиттера; следовательно, мы можем считать, что потенциал эмиттера транзистора T_2 равен нулю (равен потенциалу корпуса). Ток в резисторе R_3 равен U/R_3, и таким же будет ток коллектора (всегда следует предполагать, что в нормально работающем транзисторе токи коллектора и эмиттера равны). Значит падение напряжения на R_2 будет:



$$R_2 \frac{U}{R_3},$$

а минимальный потенциал коллектора T_2 $U_{к2мин}$ будет равен:

$$U_{к2мин} = E - \frac{R_2}{R_3} U.$$

Н. — А какую роль играет резистор R_1?

Л. — Он делает схему симметричной. Обычно сопротивление этого резистора равно сопротивлению резистора R_2. Можно также использовать напряжение коллектора T_1 в качестве выходного

напряжения, но это нецелесообразно, потому что одна площадка графика зависимости потенциала коллектора T_1 ($U_{к1}$) от потенциала базы T_1 ($U_{б1}$) (рис. 60) не горизонтальна. В самом деле, когда $U_{вх}$ имеет положительный знак, его изменения сказываются на величине тока T_1.

Как ты видишь, когда в этой схеме $U_{вх}$ имеет отрицательный знак, T_1 заперт и $U_{вх}$ не влияет ни на $U_{к1}$, ни на $U_{к2}$. Когда $U_{вх}$ имеет положительный знак, величина $U_{вх}$ влияет на величину $U_{к1}$ транзистора T_1, но не влияет на $U_{к2}$, так как T_2 заперт.

Н. — В принципе эта схема не так уж симметрична, а затем я обнаружил у нее один недостаток: переход выходного напряжения с $+U_{к2мин}$ до $+E$ происходит не так быстро, особенно в тех случаях, когда входное напряжение имеет умеренную величину (что довольно разумно для напряжения базы транзистора). А как называется твоя схема?

Л. — Название довольно странное: LTP — это сокращенный вариант английского выражения Long Tailed Pair (пара с длинным хвостом), отражающего наглядное представление пары транзисторов с длинным хвостом в виде большого резистора. Твое же замечание относительно скорости перехода напряжения от $+U_{к2мин}$ до $+E$ совершенно справедливо. Иногда это явление мешает, но скоро мы увидим, как это препятствие можно устранить.



Использование второй базы

Н. — Еще одно не нравится мне в твоей схеме: база T_2 исключительно глупо замкнута на корпус; она могла бы вести себя значительно умнее, если бы ее потенциал изменялся в обратном направлении по сравнению с потенциалом эмиттеров.

Л. — Твоя реплика вынуждает меня немедленно выложить тебе все подробности. В схеме имеется именно такой электрод, потенциал которого изменяется в обратном направлении по сравнению с потенциалом эмиттеров — взгляни на рис. 60.

Н. — Туннельный диод меня побери! Об этом-то я и не подумал. Теперь достаточно соединить коллектор T_1 с базой T_2 и будет чудесно!

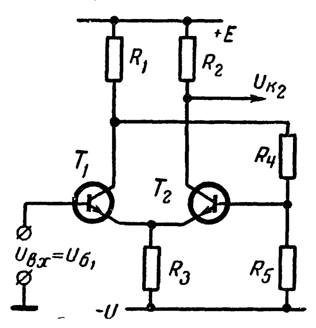


Рис. 61. Дополнив схему на рис. 58 делителем напряжения R_4, R_5, соединяющим коллектор транзистора T_1 с базой транзистора T_2, превращает ее в триггер Шмитта.

Л. — Не спеши! Идея правильная, но прямо осуществить ее нельзя; коллектор T_1 должен иметь положительный потенциал относительно эмиттеров и более высокий положительный потенциал относительно баз. Это можно сделать, как в схемах с прямой связью, о которых мы уже говорили, т. е. с помощью делителя, понижающего потенциал. В результате мы получим схему, изображенную на рис. 61. Новая схема, как и схема на рис. 58, работает с током в обоих транзисторах при напряжениях $U_{вх}$, очень близких к нулю, и ведет себя как усилитель. Соединив коллектор T_1 и базу T_2 цепочкой из резисторов R_4 — R_5, мы вводим в схему положительную обратную связь. Небольшая обратная

связь увеличивает усиление, а следовательно, увеличивает крутизну возрастающей части кривой на рис. 59. Если же положительная обратная связь становится слишком большой...

Н. — Знаю, устройство начинает генерировать.

Л. — Да, но здесь нет ни колебательного контура, ни переменной связи с помощью конденсатора. Поэтому произойдет опрокидывание. Такого состояния, когда оба транзистора дают ток, быть не может — один из транзисторов должен быть заперт.

Н. — И какой из двух станет жертвой?

Л. — Это зависит от величины $U_{вх}$. Предположим для начала, что $U_{вх}$ имеет отрицательный знак; разумеется, что в этом случае запертым окажется T_1. При увеличении напряжения $U_{вх}$ до некоторой величины A транзистор T_1 открывается, а T_2 запирается. На этот раз очень приятно, что отпирание T_2 происходит очень быстро и совершенно независимо от скорости, с какой напряжение $U_{вх}$ проходит величину A, именуемую порогом.

Н. — Чудесно! Значит я могу повышать напряжение $U_{вх}$ на 1 *в* в сутки, но когда напряжение пройдет величину A, опрокидывание схемы все равно произойдет быстро?

Л. — Конечно. Здесь имеется определенная аналогия с реле: можно медленно увеличивать ток в катушке и, когда ток достигнет нужной величины, реле сработает. В реле тоже действует положительная обратная связь: как только язычок реле начинает двигаться, воздушный зазор уменьшается и это усиливает магнитное притяжение.

Н. — А если я также медленно начну снижать напряжение $U_{вх}$, то, когда оно вновь пройдет величину A, схема также резко опрокинется обратно?

Второй порог

Л. — Схема действительно резко опрокинется обратно, но это произойдет не при прохождении величины A, а при прохождении величины B, меньшей чем A. При первом опрокидывании схемы на коллекторе транзистора T_1 высокий потенциал на базе T_2, следовательно, тоже относительно высокий (это же относится к потенциалу эммиттеров). Поэтому для отпирания транзистора T_1 напряжение $U_{вх}$ должно подняться довольно высоко. В отличие от этого при втором опрокидывании, соответствующем снижению потенциала базы транзистора T_1, ток проходит через транзистор T_1. Потенциал на его коллекторе низкий, потенциал базы T_2 тоже; это же относится и к эмиттерам. В этих условиях транзистор T_2 окажется вновь запертым только при более низком напряжении $U_{вх}$, а именно, когда оно достигнет величины B. Все происходит точно так, как в реле: когда язычок реле замкнул контакт, можно снизить ток в катушке значительно ниже уровня тока, потребовавшегося для срабатывания реле.

Н. — А что произойдет в твоей странной схеме, если у напряжения $U_{вх}$ окажется дурной вкус и оно будет держаться в пределах между A и B?

Л. — Моя странная схема называется триггером Шмитта. А если ты будешь удерживать величину напряжения $U_{вх}$ между A и B, я не смогу сказать, в каком состоянии будет триггер. В этих условиях транзистор T_1 может оказаться запертым, если напряжение $U_{вх}$ достигло своего значения, поднимаясь с величины, меньшей B; но транзистор T_1 может оказаться и открытым, если напряжение $U_{вх}$ подошло к данному значению, уменьшаясь относительно величины, большей A. Все происходит, как в реле:

если величина тока в катушке находится между током срабатывания реле I_c и его током отпускания I_0, я не могу определенно сказать, замкнут язычок реле или нет. Впрочем, если язычок не замкнут, нажми на якорь и язычок останется притянутым, а если он замкнут, оттяни якорь и язычок сохранит воздушный зазор.

Н. — Я не понимаю, зачем нужна твоя схема?

Л. — Схема интересна тем, что она не может находиться в промежуточном состоянии. У нее имеется два возможных устойчивых состояния и из-за этого свойства ее называют «бистабильной».

Н. — Но тогда для нее невозможно начертить кривую, показанную на рис. 59.

Гистерезисная характеристика



Л. — Ты ошибаешься — возможно, но немного сложнее. Для тебя я начертил такую кривую на рис. 62. Но это уже не простая кривая, а «петля». Если величина напряжения $U_{вх}$ меньше B, все ясно — выходное напряжение равно $U_{к2мин}$. Начнем повышать напряжение $U_{вх}$ (следи за стрелкой на рис. 62): при прохождении $U_{вх}$ значения A схема опрокидывается и выходное напряжение $U_{к2}$ «подскакивает» от $(U_{к2})_{мин}$ до величины $+E$

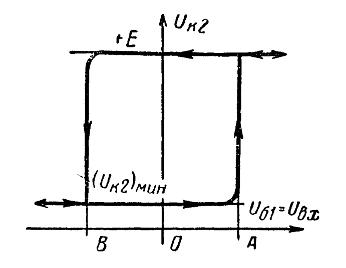
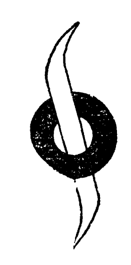


Рис. 62. Кривая, характеризующая изменение напряжения коллектора транзистора T_2 триггера Шмитта в зависимости от напряжения $U_{вх}$, свидетельствует о существовании явления, аналогичного гистерезису. Это уже не простая кривая, а петля.

(здесь поднимающаяся ветвь строго вертикальна). Дальнейшее повышение напряжения $U_{вх}$ никак не сказывается на выходном напряжении $U_{к2}$ — оно остается на уровне $+E$. Начнем теперь снижать напряжение $U_{вх}$; при прохождении величины A ничего не происходит (продолжай следить за соответствующей стрелкой на рис. 62), когда же напряжение $U_{вх}$ станет меньше величины B, схема вновь опрокинется.



Н. — Твоя кривая мне что-то напоминает... совершенно верно, она идентична петле гистерезиса ферритов, которые используются в запоминающих устройствах цифровых электронных вычислительных машин.

Л. — Ооооxx!!!

Н. — Прошу тебя, не падай в обморок. Откровенно говоря, я недавно попытался прочитать популярную статью на эту тему и теперь имею некоторое представление о значении этих выражений.



Л. — Теперь мне лучше. Позднее я объясню тебе это несколько подробнее, но твое замечание было так верно, что у меня дыхание перехватило.

Н. — А теперь, прежде чем идти дальше, я попросил бы тебя рассказать, как используется триггер Шмитта и при каких обстоятельствах прибегают к амплитудным ограничителям.

Л. — Сейчас я приведу один пример из практики. Видел ли ты на выставках системы с фотоэлементом, считающие посетителей?

Н. — Видел. В проходе установлен фонарь, посылающий луч света на небольшую коробочку, в которой должно быть находится фотоэлемент. При входе посетитель прерывает луч света.

Л. — Правильно. В такой установке при отсутствии посетителей никогда нельзя знать интенсивность попадающего на фотоэлемент света, так как световой поток от лампы может изменяться (немного со временем и значительно больше от колебаний напряжения сети). А когда посетитель перекрывает собой луч света, остаточный свет также не достаточно известен (на фотоэлемент всегда попадает сбоку некоторое количество света от других источников).

Н. — И особенно, если посетитель немного прозрачен!

Л. — Установка не рассчитана для подсчета полупризраков. Во всяком случае, как ты видишь, поступающий в фотоэлемент

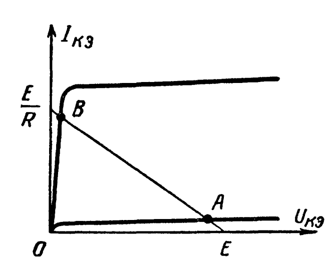
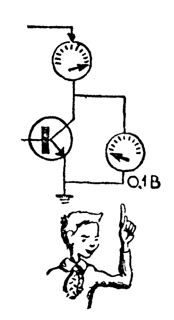


Рис. 63. Про транзистор, на который напряжение питания E подается через резистор R, говорят, что он находится в состоянии насыщения (точка B), если на его базу поступает достаточный ток. Он может также быть запертым или почти запертым (точка A).

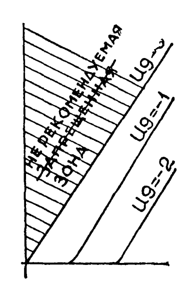
сигнал точно неизвестен. Поэтому представляется целесообразным установить на выходе фотоэлемента триггер Шмитта; благодаря ему, мы получим совершенно определенный выходной сигнал «все или ничего». Кроме того, сигнал будет иметь крутые фронт и срез, что очень важно, если мы захотим превратить сигналы в короткие импульсы, которые я тебе скоро покажу. При необходимости лишь «подрезать» сигналы сверху, можно ограничиться схемой LTP с рис. 58 или даже простым транзисторным усилителем с очень сильной перегрузкой. Как ты видишь на рис. 63, нагрузочная прямая пересекает характеристику при $I_{б.\,э} = 0$ в точке A и характеристику при $I_{б.\,э} = 100$ *мка*, например, в точке B. В точке A транзистор почти заперт (проходит лишь ток утечки), а в точке B транзистор находится в состоянии насыщения; он может пропустить значительный ток коллектора при разности потенциалов коллектор — эмиттер 0,1 *в* или даже меньше. Если мы сделаем так, что в усилителе выходной транзистор будет возбуждаться током базы, то снижающимся до нуля (и возможно даже изменяющим направление), то значительно превышающим 100 *мка*, выходное напряжение будет очень хорошо ограничено сверху и его размах (или удвоенная амплитуда выходного напряжения) будет практически равен напряжению E питания последнего каскада.



Н. — Просто чудесно, пропускать значительный ток при напряжении 0,1 *в*! О достижении такого результата на лампах и речи быть не может!

Пентод против транзистора?

Л. — Пентод позволяет получить близкий к этому результат, так как анодный ток имеет значительную величину даже при очень низком потенциале анода (потенциал анода может быть существенно ниже потенциала экранирующей сетки). Потенциал, понятно, не может опуститься до 0,1 *в*, но не следует забывать, что в жизни все относительно: рабочие напряжения у пентода значительно выше, чем у транзистора, и снижение анодного напряжения до 5 *в* при напряжении питания 300 *в* дает такое же соотношение, как и 0,1 *в* при напряжении питания 6 *в*. Само собой разумеется, что при использовании триодов получить такое ограничение сигнала немыслимо.



Н. — Но тем не менее в семействе характеристик триодов имеется характеристика, снятая при напряжении смещения, равном нулю, — она соответствует максимально возможному анодному току. Разумеется, это не позволит нам снизить почти до нуля анодное напряжение, но ограничение сигналов будет иметь место.

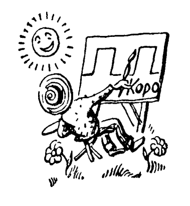
Л. — Нет, Незнайкин, нулевому смещению соответствует совсем не максимальный ток. Например, ток увеличится, если сетку сделать положительной. Конечно, такой метод не очень-то рекомендуется, но все же применяется (в частности, в пушпульном каскаде, работающем в режиме AB_2). Некоторые специалисты говорили об ограничении сверху сеточного напряжения с помощью сеточного тока, если последовательно сетке включить резистор. Такое устройство напоминает изображенную на рис. 54 схему амплитудного ограничителя, если бы в ней поменяли полярность диода. Но это плохой способ.

Само собой разумеется, что ни один из этих методов ограничения сигналов сверху не позволяет получить такие крутые фронт и срез сигнала, как с помощью триггера Шмитта.



Об использовании крутых фронтов

Н. — Но почему ты придаешь такое значение крутизне фронта и среза сигнала? Из эстетических соображений?



Л. — Совсем нет. Это необходимо, если мы захотим вновь деформировать наш прямоугольный сигнал, на этот раз путем дифференцирования.

Н. — Ой, ой! В «дифференцировании» несомненно участвуют «дифференциалы», и это начинает меня сильно беспокоить.

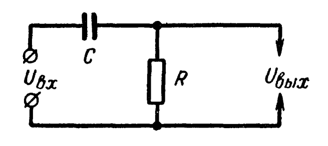


Рис. 64. Этот фильтр верхних частот называют дифференцирующей схемой. Он пропускает крутые фронты напряжения $U_{вх}$, но искажает пологие участки этого напряжения.

Л. — Для беспокойства совершенно нет причин. Знаешь ли ты цепь, изображенную на рис. 64?

Н. — Нет... прости, да! Это та самая цепь, которую включают между анодом одной лампы и сеткой следующей лампы, чтобы задержать постоянную составляющую и пропустить переменную.

Л. — Верно. Что произойдет, если на вход этого фильтра подать напряжение, изменяющееся, как показывает график на

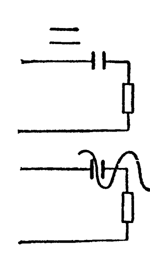


рис. 65: напряжение продолжительное время держится на одном уровне (равно нулю), а затем резко возрастает до величины A и бесконечно долго остается на этом уровне?

Н. — Ответить чрезвычайно сложно. Я могу только сказать, что пока подаваемое на вход напряжение имеет постоянную величину, выходное напряжение останется равным нулю. А вот, что произойдет потом...

Л. — Ты можешь сказать мне еще одну вещь: каким будет выходное напряжение спустя большое время после резкого изменения входного напряжения?

Н. — Если подождать довольно долго, выходное напряжение должно стать равным нулю, потому что входное напряжение опять имеет постоянную величину. А вот... $U_{вых}$ всегда равно нулю!!!

Л. — Потише! До скачка $U_{вх}$ выходное напряжение равно нулю, и большое время спустя после скачка оно вновь равно нулю, но в момент скачка входного напряжения все обстоит иначе. Предположим, что скачок происходит за время, равное нулю. Скажи, на сколько может зарядиться конденсатор за время, равное нулю?

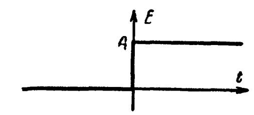


Рис. 65. Кривая скачкообразного изменения напряжения, приложенного на вход схемы, изображенной на рис. 64.

Н. — Дай подумать. Чтобы зарядиться, конденсатор должен получить некоторое количество электрической энергии. Чтобы получить энергию за равное нулю время, величина тока должна быть бесконечно большой. Но тогда разве он может зарядиться?

Л. — Скажи «совсем не может», и ты будешь прав. Никогда не забывай, Незнайкин, что: «*Напряжение на выводах конденсатора не может измениться на конечную величину за равное нулю время*».

Н. — Хорошо, твое правило я попрошу высечь на мраморе своего камина. Но какое отношение имеет оно к нашей задаче?

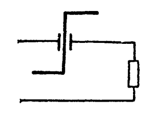
Л. — Просто-напросто оно дает нам решение. Какое напряжение было бы на конденсаторе C перед скачком $U_{вх}$?

Н. — Хм... Нуль, потому что $U_{вх}$ и $U_{вых}$ были равны нулю.

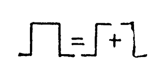
Л. — Совершенно верно. Перед самым скачком $U_{вх}$ заряжающее конденсатор напряжение было равно нулю. А каким оно стало сразу после скачка $U_{вх}$?

Н. — Твои подчеркивания «перед самым скачком» и «сразу после скачка» заставляют меня думать, что интервал между этими двумя моментами времени равен нулю. Применив твое замечательное правило, я должен сделать вывод, что заряд конденсатора имеет такую же величину, т. е. нуль.

Л. — Превосходно. Двадцать из двадцати. Однако сразу же после скачка $U_{вх}$ потенциал левой обкладки конденсатора C повысился до величины A. До какого уровня тогда поднимается потенциал правой обкладки?



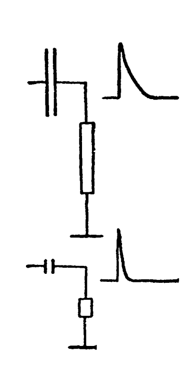
Н. — Разумеется, до величины A, потому что конденсатор C был разряжен. Но тогда... по резистору R должен пройти ток, а это невозможно, так как конденсатор не может пропустить ток!



Л. — Не увлекайся. Да, сразу же после скачка входного напряжения по резистору R пойдет ток, и в начале его величина будет A/R. Ведь конденсатор имеет полное право пропустить ток, если этот ток его заряжает; произойдет следующее: по мере заряда конденсатора C ток в резисторе R будет снижаться.

Н. — И, если подождать достаточно долго, C зарядится до напряжения A, после чего в R не будет тока, и $U_{вых}$ вновь станет равно нулю.

Постоянная времени



Л. — О, Незнайкин, как быстро ты все понимаешь сегодня! Выходное напряжение изменяется так, как я показал на рис. 66. Скорость снижения напряжения определяется произведением R на C, которое называется постоянной времени схемы и выражается в секундах (при C в фарадах и R в омах). В самом деле, чем больше емкость конденсатора C при данном сопротивлении R, тем медленнее он заряжается; чем больше сопротивление резистора R (при данной емкости C), тем больше времени требуется на заряд конденсатора. Можно легко доказать, что по истечении времени, равного постоянной времени RC, выходное напряжение падает примерно до 37% величины A. По истечении удвоенного такого отрезка времени RC выходное напряжение составляет только 13,5% величины A, а после утроенного времени RC можно

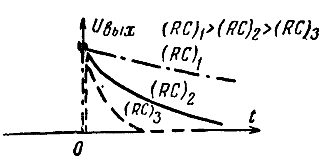


Рис. 66. Форма напряжения на выходе дифференцирующей схемы, на вход которой подается скачкообразно изменяющееся напряжение, изображенное на рис. 65. Пунктирной линией обозначена форма напряжения при малом произведении RC_3, сплошной — при среднем RC_2 и штрих-пунктирной — при большом RC_1.

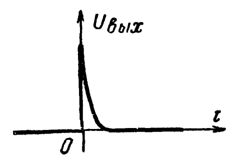
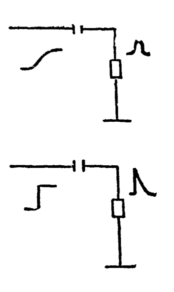


Рис. 67. Короткий импульс, получаемый на выходе дифференцирующей схемы с малым произведением RC_3 при подаче на ее вход скачкообразно изменяющегося напряжения.

сказать, что выходного напряжения уже совсем нет, так как напряжение упало до 5% величины A. Если произведение RC невелико, выходное напряжение изменяется, как показано пунктирной линией на рис. 66; при большой величине RC кривая принимает форму, показанную на рис. 66 штрих-пунктирной линией. При очень малой величине произведения RC кривая выходного напряжения имеет вид короткого сигнала импульсного типа (рис. 67).

Н. — Хорошо, это я понял. Но напряжение, получаемое на выходе триггера Шмитта или амплитудного ограничителя, имеет совсем не такую форму, как на рис. 65. Оно состоит из чередующихся фронтов и срезов. Скажи, пожалуйста, что получится, если это напряжение (рис. 68, *а*) подать на вход схемы, изображенной на рис. 64



Л. — Фронт и срез — практически одно и то же; различие между ними лишь в направлении изменений. На выходе схемы срез даст нам отрицательный импульс (рис. 68, *б*.)

Н. — В сущности это очень просто. Теперь я понимаю, почему ты так стремишься получить крутые фронт и срез: при медленном изменении напряжения конденсатор C успел бы заряди-

ться и перестал бы передавать изменения входного напряжения. Но и в этих условиях можно получить хороший результат, достаточно увеличить R или C (или обе величины) и тогда C будет мало разряжаться во время изменения сигнала.

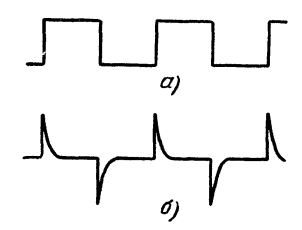


Рис. 68. Прямоугольный сигнал (*а*) представляет собой периодическую последовательность резких подъемов и спадов. Дифференцирующая схема с малой постоянной RC превращает этот сигнал в чередующиеся положительные и отрицательные импульсы (*б*).

Л. — Незнайкин, ты сегодня определенно в прекрасной форме, но будь осторожен; если ты увеличишь произведение RC, может случиться, что между двумя сигналами C не успеет полностью зарядиться; тогда выходное напряжение примет такую форму, которую я изобразил для тебя на рис. 69. Поэтому нужно сделать постоянную времени RC большой по сравнению с длительностью сигнала и малой по сравнению с периодом сигнала. Чем меньшую часть периода занимает сигнал, тем легче подобрать постоянную времени RC.

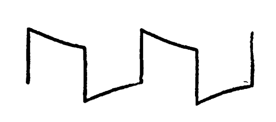


Рис. 69. Если постоянная времени RC схемы достаточно велика по сравнению с периодом сигнала, то выходное напряжение принимает иную форму. Конденсатору C не хватает времени полностью зарядиться.

Н. — Бедный сигнал, его решительно лишили человеческого лица! Исходную синусоиду (можно предположить, что сначала наш сигнал имел именно такую форму) с помощью триггера Шмитта превратили в прямоугольные сигналы, а затем в короткие импульсы с помощью твоей схемы с рис. 64... кстати, как называется эта схема?

Интегрирующая схема

Л. — Ее называют дифференцирующей схемой. Как видишь, ты напрасно испугался этого названия. Но мы на этом не остановимся, ибо сигнал можно подвергнуть и другим деформациям. Что ты думаешь о схеме на рис. 70? Ее название я скажу тебе потом.

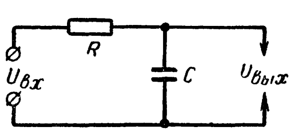


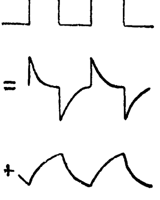
Рис. 70. Фильтр нижних частот, используемый в качестве интегрирующей схемы.

Н. — Это та же самая схема, что показана на рис. 64, только ты поменял местами R и C.

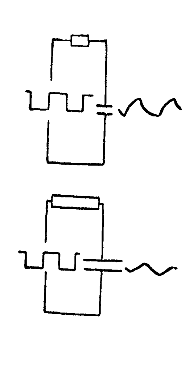
Л. — Но эта деталь все изменяет! Что мы получим на выходе схемы, если на ее вход подадим прямоугольные сигналы?

Н. — Здесь имеются резистор и соединенный с ним последовательно конденсатор, поэтому мы возможно получим то, что ты раньше нарисовал на рис. 68, *б*.

Л. — Какой ужас! Ведь я тебе объяснял, что: «Напряжение на выводах конденсатора не может измениться на конечную ве-



личину за равное нулю время». Но посмотри, Незнайкин, если на вход схемы (рис. 64) приложить прямоугольные сигналы (см. рис. 68, *а*) и если на выходе, т. е. на выводах резистора *R*, получим сигнал, изображенный на рис. 68, *б*, то на выводах конденсатора должен быть такой сигнал, который, будучи прибавленным к сигналу на рис 68, *б*, даст сигнал, показанный на рис. 68, *а*.



Н. — Ты хочешь сказать разность этих двух сигналов? Хорошо, я могу найти ее графически. Подожди минутку... интересующий тебя сигнал я начерчу на рис. 71.

Л. — Очень хорошо. Как ты видишь, на выводах конденсатора находится тот самый сигнал, который мы получим на выходе схемы, приведенной на рис. 70. Этого можно было ожидать.

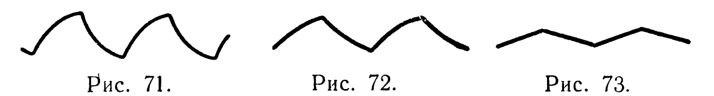


Рис. 71. Рис. 72. Рис. 73.

Рис. 71. При подаче на вход интегрирующей схемы прямоугольного сигнала с большим по сравнению с постоянной времени *RC* периодом на выходе получают сигнал с округленными фронтами, очень мало похожий на входной сигнал.

Рис. 72. При большей величине *RC* конденсатор *С* не успевает полностью зарядиться между двумя изменениями напряжения.

Рис. 73. При дальнейшем увеличении произведения *RC* амплитуда выходного сигнала уменьшается.

При изменении входного сигнала сигнал на выходе реагирует не сразу, так как требуется некоторое время, пока конденсатор *С* зарядится до нового напряжения.

Н. — Фронты и срезы твоего прямоугольного сигнала стали наклонными и округленными. Для чего нужен такой сигнал?

Л. — Такой сигнал, как ты нарисовал, действительно не представляет большого интереса. Но предположим, что я увеличу произведение *RC*. Как при этом изменится форма сигнала на выходе?



Н. — Я предполагаю, что конденсатор *С* получит меньше тока (он увеличился и его потребности возросли), и поэтому он не успеет зарядиться к моменту прихода второго сигнала. Вероятно, в результате получим сигнал, форма которого показана на рис. 72.

Л. — Ты прав. Если еще увеличить *RC*, то выходное напряжение будет изменяться мало и выходной сигнал примет форму, изображенную на рис. 73.

Зубья пилы для пилки дерева

Н. — Смотри, твоя кривая состоит из прямых отрезков!

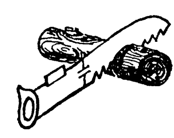
Л. — Так оно и есть. Выходное напряжение по сравнению с входным мало, и можно сказать, что напряжение на выводах резистора *R* в интервалах между переходами почти постоянное. Следовательно, зарядный (или разрядный) ток остается почти постоянным и конденсатор *С* заряжается (или разряжается) почти линейно. Чтобы ты мог лучше видеть форму напряжения на выходе, я увеличил масштаб полученной кривой по вертикали (рис. 74).

Н. — Странная форма, прямо как зубья пилы для пилки дерева.

Л. — Верно, по этой причине сигнал назвали «зубьями пилы для пилки дерева» или «симметричным пилообразным сигналом». Его используют в тех случаях, когда нужно периодически



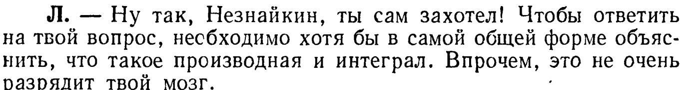
Рис. 74. Если выходной сигнал (рис. 73) вычертить в другом масштабе, четко видны почти равносторонние треугольники, напоминающие зубья пилы для пилки дерева.



и линейно изменять напряжение вверх и вниз. Это один из возможных случаев применения изображенной на рис. 70 схемы, которую называют интегрирующей.

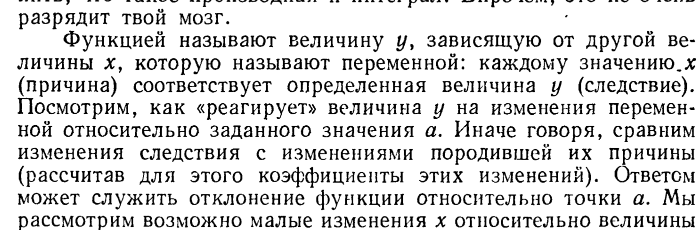
Н. — Так вот почему ты не хотел сказать мне название схемы! Но скажи, пожалуйста, почему этим схемам дали такое жуткое название?

Математические определения



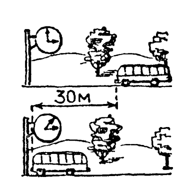
Л. — Ну так, Незнайкин, ты сам захотел! Чтобы ответить на твой вопрос, необходимо хотя бы в самой общей форме объяснить, что такое производная и интеграл. Впрочем, это не очень разрядит твой мозг.

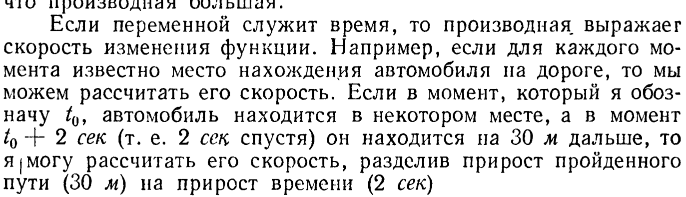




Функцией называют величину y, зависящую от другой величины x, которую называют переменной: каждому значению x (причина) соответствует определенная величина y (следствие). Посмотрим, как «реагирует» величина y на изменения переменной относительно заданного значения a. Иначе говоря, сравним изменения следствия с изменениями породившей их причины (рассчитав для этого коэффициенты этих изменений). Ответом может служить отклонение функции относительно точки a. Мы рассмотрим возможно малые изменения x относительно величины a, чтобы точнее установить, как ведет себя функция в окрестности величины a.

Как ты видишь, мы легонько «пощекочем» переменную (причину) и посмотрим, как это скажется на функции (следствии). Если следствие этого «щекотания» будет велико, мы скажем, что производная большая.





Если переменной служит время, то производная выражает скорость изменения функции. Например, если для каждого момента известно место нахождения автомобиля на дороге, то мы можем рассчитать его скорость. Если в момент, который я обозначу t_0, автомобиль находится в некотором месте, а в момент $t_0 + 2$ *сек* (т. е. 2 *сек* спустя) он находится на 30 *м* дальше, то я могу рассчитать его скорость, разделив прирост пройденного пути (30 *м*) на прирост времени (2 *сек*)

$$30 \text{ м} : 2 \text{ сек} = 15 \text{ м/сек} \text{ (или 54 км/ч)}.$$

Следовательно, я могу сказать, что скорость есть производная от пройденного пути по времени. Эта производная велика, когда пройденный путь быстро увеличивается с увеличением времени.

Дифференцирование с помощью схемы

Н. — Довольно туманно. Мне представляется, что это несколько напоминает схему на рис. 64. Если входное напряжение увеличивается быстро, то зарядный ток конденсатора C будет большой, что даст большое напряжение на выходе.

Л. — Ты очень хорошо понял. Но в нашем примере с автомобилем, разумеется, не может быть резкого изменения пройденного пути, так как соответствующая этому изменению скорость была бы бесконечно большой...

Н. — Вот чему могли бы позавидовать все бегуны!

Интеграл

Л. — Но это невозможно, так как «бесконечно большую» скорость нужно было бы достичь за ничтожно малый отрезок времени, что в свою очередь требует бесконечно большого ускорения. Но поговорим теперь о математическом определении интегрирования. Ты можешь получить прекрасное представление на том же примере с автомобилем, если теперь предположить, что для каждого момента мы знаем не место машины на дороге, а ее скорость (например, зафиксировав самописцем показания спидометра).

Задача сводится к определению пройденного автомобилем пути к соответствующему моменту времени.

Н. — Это совсем просто. Достаточно умножить среднюю скорость на время движения.

Л. — Твои рассуждения совершенно справедливы, но только для случая, когда скорость остается строго постоянной. Однако имеются серьезные основания полагать, что этого не случится. Наш автомобилист будет проезжать через населенные пункты, где ему придется снизить скорость, ему попадутся хорошие участки дороги, где он сможет «жать на всю железку», и в результате его скорость не будет постоянной.

Н. — Тогда я совсем не знаю, что делать...

Л. — Мы просто-напросто применим твой метод, но разделим время на небольшие интервалы, каждый из которых настолько короток, что в его пределах скорость можно рассматривать как неизменную...

Н. — Но это все изменяет! Твои расчеты не будут соответствовать реальной действительности.

Л. — Именно такого заявления от тебя я и ждал. Чем больше интервалов мы возьмем, тем ближе наша оценка будет к реальной действительности. Не забывай, что обычно скорость автомобиля довольно медленно изменяется во времени...

Н. — Я такого мнения не придерживаюсь. Помнишь я говорил тебе о своем приятеле, купившем спортивный автомобиль; ему нужно всего лишь несколько секунд, чтобы разогнать свою машину до 180 *км/ч*...



Л. — Согласен, но я-то говорил тебе о нормальных людях. Если мы возьмем очень короткий интервал времени, например, 1 *сек*, и если зафиксированная в какой-то момент этого интервала скорость будет около 36 *км/ч* (или 10 *м/сек*), то мы можем сказать, что пройденный за эту секунду путь будет очень близок к 10 *м*.

Складывая рассчитанные таким образом отрезки пути, пройденные за очень короткие интервалы времени, мы получим сумму, состоящую из огромного числа малых слагаемых, при этом полученный результат будет достаточно близок к истинному.

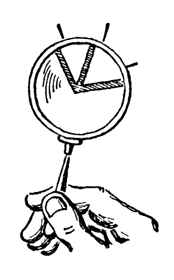
В своих действиях математика исходит из подобного представления, доводя дело до крайности — предполагая, что количество интервалов бесконечно растет, а протяженность их бесконечно уменьшается. В этом случае они говорят, что проинтегрировали некоторую функцию.

Н. — Термин этот мне в высшей степени не нравится. Но как бы там ни было, твой знаменитый «интеграл» кажется мне

прямой противоположностью тому, о чем ты мне только что говорил, а именно производной. Если память мне не изменяет, вычисление производной позволяет определить скорость по местоположению, а противоположная операция позволяет рассчитать местоположение по скорости.

Л. — Ты очень правильно понял. Только математики говорят не противоположная, а обратная операция. Я думаю, что теперь ты видишь аналогию между интегрированием и действием схемы рис. 70...

Н. — Я не вижу никакого сходства.

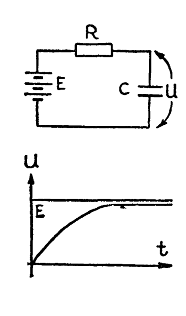


Интегрирование с помощью схемы

Л. — Сейчас увидишь. Предположим, что на вход этой схемы я подаю постоянное напряжение. Какое напряжение получим мы на выходе?

Н. — Ну, разумеется, классическую кривую заряда конденсатора — кривая напряжения поднимается и затем округляется, стремясь достичь максимума, равного приложенному на вход постоянному напряжению.

Л. — Прекрасно, Незнайкин. Если внимательнее рассмотреть эту кривую, то заметим, что в ней имеется небольшой участок равномерного подъема, который соответствует времени, когда выходное напряжение мало по сравнению с входным. Впрочем, это абсолютно логично, ведь на выводах резистора действует разность входного и выходного напряжений. Если входное напряжение имеет постоянную величину, выходное удерживается небольшим и проходящий через R зарядный ток практически остается постоянным. В этих условиях заряд конденсатора нарастает равномерно (а правильнее сказать «линейно»).

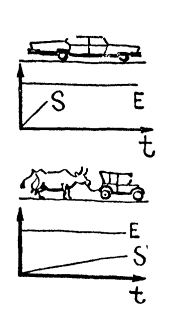


Н. — Хорошо, до сих пор все понятно, но я не вижу никакой связи между твоей историей с автомобилем и интегрированием.

Л. — Все очень просто. Приложи на вход схемы рис. 70 напряжение, в каждый момент пропорциональное скорости автомобиля. Что произойдет, если при этом предположить, что выходное напряжение останется небольшим?

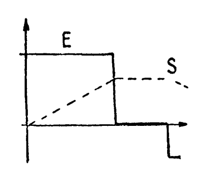
Н. — Раз мы предположили, что выходное напряжение ничтожно мало, протекающий по резистору ток в каждый момент будет пропорционален входному напряжению. Следовательно, конденсатор будет заряжаться быстрее или медленнее в соответствии с величиной входного напряжения (т. е. если я не ошибаюсь, скорости автомобиля).

Л. — Нет необходимости анализировать дальше, так как все нас интересующее уже произошло: в каждый момент напряжение на выводах заряжающегося конденсатора повышается точно так же, как увеличивается пройденный автомобилем путь. Если скорость большая (входное напряжение высокое), конденсатор зарядится быстро, напряжение на его выводах поднимается так же быстро, как увеличивается пройденный автомобилем путь, когда он движется быстро. Если в один прекрасный момент автомобиль остановится, входное напряжение становится равным нулю и конденсатор перестает заряжаться.



Н. — А, нет. Я с тобой совершенно не согласен; когда напряжение равно нулю, конденсатор разряжается.

Л. — Строго говоря, ты прав. Но мы предположили, что входное напряжение, а также сопротивление резистора и емкость конденсатора велики. Напряжение на выводах конденсатора всегда очень мало по сравнению с нормальными величинами входного напряжения. Когда входное напряжение исчезает, конден-



сатор действительно немного разряжается, но этот разряд ничтожно мал.

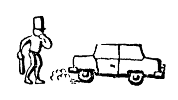
Н. — Теперь я начинаю понимать, и у меня даже возникла идея.

Л. — Обычно к твоим идеям я отношусь с недоверием, но все же расскажи, что ты придумал.

Н. — Если случайно машина начинает пятиться назад, то при известной ловкости можно считать, что ее скорость стала отрицательной.

Л. — Все правильно, в этом нет никаких фокусов, это совершенно правильное алгебраическое выражение.

Н. — Хорошо, но при таких условиях мы получим на входе схемы (рис. 70) отрицательное напряжение. Оно имеет значительную величину, и мы можем сказать, что конденсатор *C* разряжается. Точно такую же картину можно видеть на спидометре катящегося назад автомобиля — счетчик пройденного пути начнет крутиться в обратную сторону.



Л. — Прими мои поздравления, Незнайкин, ты прекрасно понял... В самом деле подаваемое на вход напряжение может быть отрицательным. Но мне не хотелось бы оказаться рядом с тобой в автомобиле при выполнении эксперимента на практике, когда ты попытаешься быстро ехать назад, оставаясь на правой стороне дороги. Но за исключением этого случая, который относится лишь к правилам уличного движения, твоя идея полностью обоснована.



Совершенно — только ничто

Н. — Да, но... прости, здесь имеется одно непонятное мне обстоятельство. Ты сказал, что схема на рис. 70 ведет себя правильно, т. е. ведет себя как интегрирующая схема, только при условии, что выходное напряжение очень маленькое. Но когда ездишь, машина неизбежно накапливает пройденные километры, иначе говоря, конденсатор *C* накопит вольты. Что же тогда делать, ведь ты уже не сможешь сказать, что выходное напряжение останется небольшим по сравнению с входным напряжением?

Л. — Ты совершенно прав. Эта система сохраняет работоспособность как интегрирующая в течение ограниченного времени, и это время можно увеличить, если подобрать высокоомный резистор и конденсатор большой емкости. Таким подбором можно сделать напряжение на выводах конденсатора чрезвычайно низким.





Н. — Но тогда, доводя дело до крайности, можно было бы сказать, что твоя схема действительно совершенна только в том случае, когда не дает никакого напряжения на выходе.

Л. — Незнайкин, ты попал прямо в один из управляющих миром философских принципов. Совершенство нам не свойственно, а совершенным могло бы быть лишь нечто, стремящееся к нулю. Мы же привыкаем к далекому от совершенства и от нуля и считаем это очень хорошим.

Н. — Я полагаю, что достаточно внимательно слушал тебя, но у меня складывается впечатление, что от интегрирования знаний мой мозг достиг такого напряжения, что верность восприятия, о которой ты говоришь, стала чрезвычайно далекой от совершенства, поэтому наступило время прервать нашу беседу.

Беседа восьмая

Заразившись ненасытным желанием деформировать сигналы, Незнайкин узнает способы умножения, а затем деления частоты, что побуждает Любознайкина рассказать ему о мультивибраторе. Рассуждения о делении на четные числа подготавливают Незнайкина к мысли о существовании схемы Экклеса-Джордана с двумя устойчивыми состояниями, которая путем «гибридизации» с мультивибратором дает схему с одним устойчивым состоянием. Незнайкин поддается соблазну заменить эту схему (при использовании ее в качестве «задержки импульсов») схемой «опережения импульсов» (разумеется, системы Незнайкина).

Умножение и деление частоты

Незнайкин — Дорогой Любознайкин, мне кажется, что, стараясь с присущей тебе изощренностью максимально деформировать сигнал, ты тем не менее проявил непонятную скромность.

Любознайкин — Я уже говорил тебе, что дело не в изощренности, а в электронике. Внеся справедливости ради эту поправку, я все же хочу знать, в чем я согрешил.

Н. — Своими преобразованиями ты настолько исказил форму сигналов, что теперь породивший их генератор не сможет узнать своих детей, но тем не менее, а может быть и вопреки своему желанию, ты сохранил частоту сигналов.



Л. — О, если речь идет только об этом, то, чтобы доставить тебе удовольствие, мы сейчас поговорим об умножении и делении частоты...

Н. — Вряд ли стоит заниматься этим вопросом только ради моего удовольствия, так как предчувствую, что это должно быть дьявольски сложно.

Л. — «Сложно» не то слово, можно сказать трудно доступно для понимания и даже большее... Ты когда-нибудь слышал о системах, умножающих частоту?

Н. — Никогда, и я даже не вижу, где такие системы могли бы понадобиться.

Умножение частоты

Л. — Ну, хорошо, сейчас ты это увидишь. Тебе, конечно, приходилось пользоваться кварцевым генератором?

Н. — Да, и я даже сделал один такой генератор, и он до сих пор работает достаточно хорошо. Кварцевый генератор дает исключительно стабильную частоту, что в нашем мире с его непрерывными изменениями вселяет некоторую уверенность.

Л. — А какую, по-твоему, наиболее высокую частоту можно получить при кварцевой стабилизации?

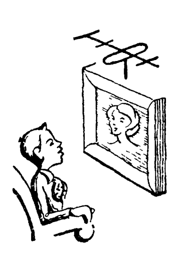
Н. — О, у меня никогда не возникало потребности в частотах выше 3 или 4 *Мгц*.

Л. — Ты может быть при необходимости и нашел бы кварц, работающий на частоте в два десятка мегагерц, но на более высокие частоты, во всяком случае, например, для частоты 185,25 *Мгц*, сделать кварц очень трудно.

Н. — Но я совершенно не вижу, какой интерес может представлять такая частота!

Л. — Из этого я могу заключить, что ты никогда не смотрел телевизионные передачи. А ведь частоту передатчика телевизионных сигналов тоже полезно стабилизировать кварцем [1].

Н. — Транзистор меня побери! Об этом-то я и не подумал. И ты думаешь, что заказанный специально для частоты 185,25 *Мгц* кварц можно непосредственно использовать в передатчике?



Л. — Конечно, нет. Чем выше частота, на которой должен работать кварц, тем тоньше он должен быть; а на нашей частоте 185,25 *Мгц* он был бы очень тонкий...

Н. — Вероятно, как иллюзии...

Л. — Незнайкин, вместо измышлений, достойных астролога—предсказателя судьбы, ты бы лучше подумал, что сделать кварц толщиной в несколько микрон невозможно. Поэтому нам придется ограничиться кварцем, дающим частоту значительно ниже требующихся 185,25 *Мгц*.

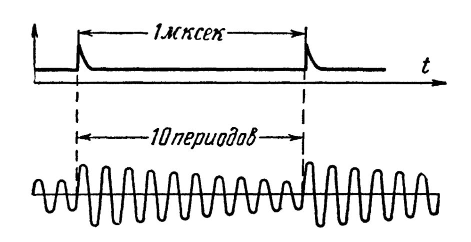


Рис. 75. Импульсы с частотой 1 *Мгц* через каждые десять периодов возбуждают колебания в колебательном контуре, настроенном на частоту 10 *Мгц*. Частота выходного напряжения колебательного контура в 10 раз выше частоты возбуждающих импульсов.

Н. — В этом случае, мой дорогой друг, я с сожалением вынужден сказать, что раз кварц не дает нужную для передатчика частоту, я ровным счетом ничем помочь не могу.

Л. — Позволь мне возразить тебе, дорогой Незнайкин, я могу удовлстворится кварцем со значительно меньшей частотой, если я способен умножить эту частоту в целое число раз.

Н. — Издалека же ты привел меня к этому. Предполагаю, что теперь ты объяснишь мне, как умножают частоту. Признаюсь, что эта проблема меня уже изрядно заинтриговала.

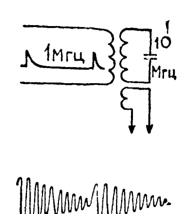
Л. — Дело значительно проще, чем ты думаешь. Ты, разумеется, слышал о колебательных контурах. Как тебе известно, в устройстве, состоящем из конденсатора и катушки индуктивности, при возбуждении электрическим импульсом возникают собственные колебания, частота которых определяется по формуле Томсона



$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Предположим, что мы сделали колебательный контур с частотой собственных колебаний 10 *Мгц*. Начнем возбуждать этот

[1] Здесь имеется в виду несущая частота, т. е. частота, соответствующая режиму молчания и отсутствия передачи изображения (*Прим. ред.*).



контур короткими электрическими импульсами с частотой повторения 1 *Мгц*. При каждом импульсе в нашем контуре возникают колебания с частотой 10 *Мгц*, которые имеют тенденцию затухать, т е. их амплитуда уменьшается. В момент конца десятого колебания приходит новый импульс, придающий колебаниям «новые силы» (рис. 75), и цикл вновь повторяется.

Н. — Но здесь нет настоящего умножения частоты.

Л. — Так что же тебе надо? Я ввожу в схему импульсы с частотой 1 *Мгц* и получаю колебания с частотой 10 *Мгц*.

Н. — Да, до сих пор я внимательно следил за твоими объяснениями, но частоту 10 *Мгц* дает колебательный контур, и согласись, она не связана никаким соотношением с частотой воздействующих на контур импульсов.

Управление с помощью контура

Л. — Действительно никакого соотношения не было бы, если бы я не настроил умышленно колебательный контур так, что его собственная частота стала точно в 10 раз выше частоты приложенных колебаний. Теперь же новый импульс, придающий колебаниям «новые силы», дает этот толчок как раз в тот момент, когда должен кончиться десятый период. Таким образом мы получили частоту 10 *Мгц*, которая как бы «управляется» импульсами с частотой повторения 1 *Мгц*. А теперь представь себе, что частота следования этих импульсов увеличивается на 0,5%. Каждый подаваемый внешний импульс будет немного раньше «толкать» контур, частота собственных колебаний которого равна 10 *Мгц*. В результате этого выходная частота повысится тоже на 0,5%. Само собой разумеется, что подобная система допускает только очень небольшие изменения входной частоты. Принимая во внимание, что речь идет об умножении на постоянное число частоты, стабилизированной кварцем, можно быть уверенным, что изменения этой частоты всегда очень невелики.



Н. — Хорошо, я согласен, что это действительно умножение частоты. Но одно в твоей системе меня шокирует: если для получения исходной частоты мне придется использовать стабилизированный кварцем генератор, то я сделаю все, чтобы он давал синусоидальное напряжение. Тогда он не сможет дать импульсы, способные возбудить колебательный контур.

Л. — Незнайкин, а разве ты забыл, о чем мы говорили прошлый раз? Неужели ты думаешь, что три́ггер Шмитта, дифференцирующая и другие схемы были изобретены только для того, чтобы доставлять неприятности Незнайкину? Ими также можно воспользоваться.

Н. — Должен признаться, что сейчас я о них как-то забыл. Но все эти устройства представляются мне относительно сложными.

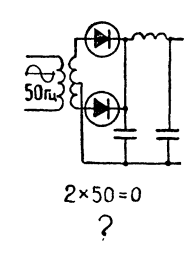
Л. — Ты действительно считаешь сложными устройства, состоящие из двух в высшей степени рядовых транзисторов и четырех резисторов и требующие для настройки одну или две минуты, если только вообще здесь можно говорить о настройке? Если ты, Незнайкин, останавливаешься на этом, то я предпочитаю немедленно отправиться спать.

Апериодическое умножение

Н. — Ну хорошо, предположим, что я этого не говорил. Но... прости мою несомненно ужасную привычку всегда выискивать возражения... Я все же нахожу довольно прискорбным,

что система умножения частоты требует на входе такой высокой стабильности. Не можешь ли ты показать умножающую систему, допускающую значительные изменения входной частоты?

Л. — Незнайкин, найди мне одну такую систему, и я гарантирую, что на этот раз ты сможешь получить столь желанный патент и несомненно заработаешь на нем кучу денег (вернее, дашь возможность заработать деньги фирмам, которые будут выпускать по этому патенту аппаратуру). Но чтобы тебя несколько утешить, я могу познакомить тебя с более простыми методами умножения частоты. Результаты, правда, не сенсационные, но методы позволяют осуществлять умножение при больших изменениях входной частоты. Я даже уверен, что ты уже производил удвоение частоты.



Н. — Э! Конечно, нет! Ведь я-то бы знал.

Л. — И ты несомненно это знаешь. Тебе, конечно, доводилось собирать на двух вентилях выпрямитель для получения постоянного напряжения от сети?

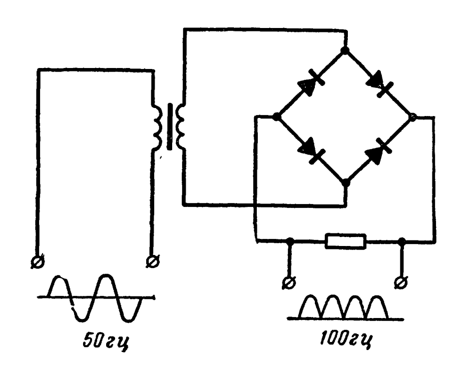


Рис. 76. Двухполупериодное выпрямление переменного напряжения 50 *гц* удваивает основную частоту, так как частота импульсов выпрямленного напряжения (тока) равна 100 *гц*.

Н. — О, разумеется, но этот случай очень далек от удвоения частоты. Я использую ток с частотой 50 *гц* и получаю ток с частотой 0 *гц*... Если ты называешь это удвоением, то мне остается только склониться перед твоей мудростью.

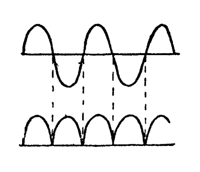
Л. — Я имел в виду не то, что ты получаешь после фильтра, а то, что можно наблюдать до фильтра. Так как вентили работают поочередно, каждый в течение своего полупериода, то на выходе фильтра ты обнаружишь напряжение с частотой, равной удвоенной частоте сети (рис. 76), иначе говоря 100 *гц*.

Н. — Но это напряжение незначительно; сглаживающий фильтр и установлен там, чтобы убрать эту составляющую.

Л. — Да, но если ты не поставишь никакого фильтра, то получишь выпрямленное напряжение, состоящее из импульсов, соответствующих двум полупериодам, которые в основном содержат переменное напряжение частоты 100 *гц*, наложенное на постоянную составляющую.

Н. — Согласен, что частота этих импульсов напряжения равна 100 *гц*, но форма напряжения чрезвычайно далека от синусоиды.

Л. — Но я никогда и не говорил, что это синусоида. Если внимательно проанализировать полученное напряжение, то кроме постоянной составляющей и переменной составляющей с частотой 100 *гц* можно обнаружить гармоники, которые и придают кривой такую странную форму. Впрочем, с помощью фильтра очень легко



устранить гармоники и оставить одну переменную составляющую с частотой 100 *гц* [1].

Н. — Хорошо, но если там имеется фильтр, система не годится для применения на всех частотах.

Л. — Полностью согласен, но я никогда не претендовал, что показываю тебе абсолютно универсальный удвоитель частоты.

Каскадное умножение

Н. — Но тогда твое отфильтрованное напряжение 100 *гц* можно было бы подать на другую аналогичную систему, полученные 200 *гц* вновь отфильтровать и в свою очередь...

Л. — Браво, Незнайкин, ты прекрасно понял, что часто целесообразно производить несколько последовательных умножений частоты. Так, например, для получения колебаний с частотой 185,25 *Мгц*, о которых я тебе уже говорил, лучше всего

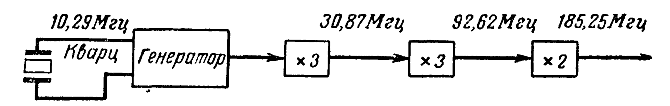


Рис. 77. Кварцевый генератор, работающий на частоте 10,29 *Мгц*, в сочетании с двумя утраивающими и одним удваивающим частоту каскадами дает частоту 185,25 *Мгц* с такой же стабильностью, что и кварцевый генератор, хотя кварцев на такую частоту нет.

воспользоваться кварцевым генератором с частотой 10,29 *Мгц*. Утроив частоту методом, использующим колебательный контур, настроенный на третью гармонику кварца, с которым я тебя уже познакомил, получим 30,87 *Мгц*. Подадим колебание с полученной частотой на вход усилителя, работающего в режиме насыщения и имеющего тенденцию выдавать не столько импульсы, сколько гармоники. Колебательный контур, настроенный на его третью гармонику, позволит выделить колебание с частотой 92,62 *Мгц*. Удвоив ее, получим требующуюся нам частоту 185,25 *Мгц* (рис. 77).

Деление частоты

Н. — Если частоту сигнала можно умножить, то вполне законно предположить, что ее можно и разделить. Это правильно, Любознайкин?

Л. — Хотя логика твоих рассуждений сомнительна, ты сделал правильный вывод. Я бы даже сказал, что разделить частоту легче, чем умножить. Для этого существует несколько методов, и мы последовательно рассмотрим основные из них.

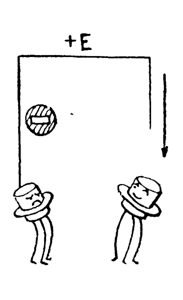
Если частота изменяется относительно мало, можно взять импульсный генератор и синхронизировать его подлежащей делению частотой.

---

[1] Для периодических сигналов имеет смысл говорить об их основном периоде, основной частоте, так как периодический сигнал может содержать бесконечно много гармонических составляющих, частоты которых равны целому числу величин, обратных периоду повторения (*Прим. ред.*).

Н. — Что ты называешь импульсным генератором?

Л. — Например, мультивибратор. Принцип работы этого устройства проще, чем ты думаешь. Его схему я подготовил для тебя на рис. 78.



Н. — Действительно, при рассмотрении схема не производит впечатления сложной. Но теперь я не очень доверяю твоим подобным заявлениям. Можно сказать, что это двухкаскадный усилитель, выход которого замкнули на вход.

Л. — Абсолютно верно, и именно по этой причине устройство начинает генерировать. Вспомни, что я рассказывал тебе о дифференцирующих схемах, и ты довольно легко поймешь, как работает новая. Предположим, что вначале ток проводит транзистор T_1 и что он находится даже в состоянии насыщения. Схема

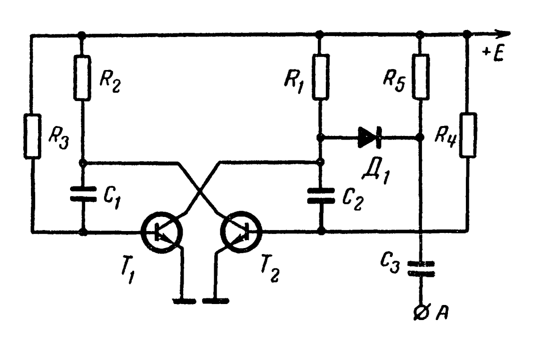
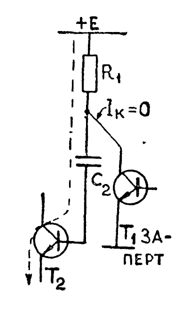


Рис. 78. Мультивибратор на двух транзисторах. Транзисторы поочередно запираются и отпираются; когда один из них заперт, другой находится в состоянии насыщения и наоборот.

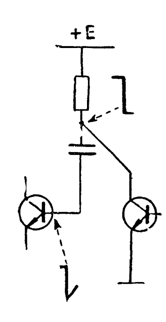
между его коллектором, эмиттером и базой оказывается как бы замкнутой накоротко. Мы должны предположить, что в этот момент транзистор T_2 заперт, так как напряжение на его базе отрицательное. В этих условиях протекающий по резистору R_4 ток, разряжая конденсатор C_2, стремится снизить отрицательный потенциал базы этого транзистора (и даже сделать его положительным). В один прекрасный момент база T_2 становится положительной...

Н. — Тогда этот транзистор тоже начинает пропускать ток и также достигает состояния насыщения, и на этом все останавливается.



Л. — Не торопись, Незнайкин. Если транзистор T_2 начнет проводить ток, то потенциал его коллектора, который был равен $+E$, резко упадет до нуля. Это резкое изменение через конденсатор C_1 будет полностью передано на базу транзистора T_1. База резко станет отрицательной, и транзистор T_1 окажется запертым. Одновременно с этим повышение потенциала коллектора транзистора T_1 приводит к заряду конденсатора C_2 и тем самым поможет транзистору T_2 достичь состояния насыщения.

Так как база транзистора T_1 имеет отрицательный потенциал, протекающий по резистору R_3 ток разряжает конденсатор C_1 и повышает потенциал базы T_1 до тех пор, пока он достигнет небольшой положительной величины. В этот момент транзистор T_1



начнет пропускать ток, что вызовет запирание транзистора T_2, и все начнется сначала. На рис. 79 я нарисовал тебе изменения напряжений на коллекторах и на базах обоих транзисторов.

Н. — Я примерно догадываюсь, как это происходит, хотя и дьявольски сложно понять. По сути дела напряжения на базах имеют примерно такую же форму, что и на рис. 69, и это вполне нормально, потому что эти напряжения получены после цепочек связи, состоящих из конденсаторов и резисторов. Но меня изрядно удивляет форма напряжений на коллекторах. Почему напряжение так медленно повышается и так резко падает?

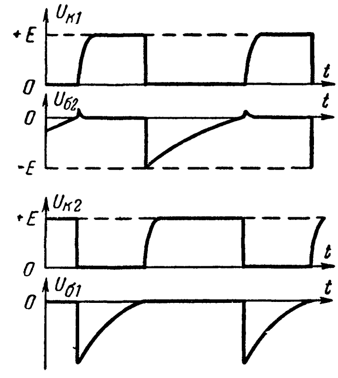


Рис. 79. Форма напряжений показанного на предыдущем рисунке мультивибратора.

Л. — Медленный подъем кривой объясняется очень просто. Когда, например, транзистор T_1 запирается, потенциал его коллектора не может быстро повышаться, так как для этого конденсатор C_2 должен зарядиться через резистор R_1. Это придает кривой, о которой ты говоришь, закругленную форму.

А когда транзистор, например T_1, резко отпирается, то схема по его коллектору как бы замыкается накоротко. Этим и объясняется большая крутизна спада напряжения на коллекторах, которую можно видеть на кривых изменения потенциалов коллекторов T_1 и T_2. Кроме того, не следует забывать, что обе базы транзисторов не могут одновременно стать положительными. Как только база оказывается под малым положительным потенциалом, переход база — эмиттер становится проводящим, образуя настоящее короткое замыкание на корпус. Этим и объясняются горизонтальные участки кривых напряжений обеих баз на рис 79.

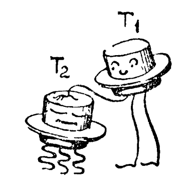


Можно было бы еще очень многое рассказать о мультивибраторе, но твоих знаний уже достаточно, чтобы иметь возможность использовать его в качестве делителя частоты.

Условия насыщения

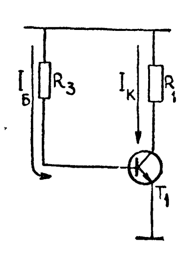
Н. — Прежде чем заняться делением частоты, я хотел бы задать один вопрос. Ты сказал, что транзисторы T_1 и T_2 находятся в состоянии насыщения, когда работают. Я тебе верю, но хотел бы знать, почему.

Л. — Задавая этот вопрос, ты абсолютно прав. Предположим, например, что сейчас ток проводит транзистор T_1. Ток его базы проходит через резистор R_3. Потенциал базы почти равен потенциалу эмиттера, как это бывает в любом не запертом транзисторе. Следовательно, падение напряжения на резисторе R_3 практически равно $+E$. Значит, протекающий по этому резистору ток, т. е. ток базы транзистора T_1, приблизительно равен E/R_3.



Кроме того, если этот транзистор находится в состоянии насыщения, потенциал его коллектора практически равен нулю, а ток коллектора приблизительно равен E/R_1.

Поэтому для выполнения условия насыщения достаточно иметь такой коэффициент усиления транзистора по току (который мы обозначаем буквой β), чтобы произведение тока базы E/R_3 на β было больше максимального тока, который сможет пропустить коллектор, т. е. $\frac{E}{R_3}\beta > \frac{E}{R_1}$. Возьмем для наглядности числовой пример. Пусть коэффициент усиления транзистора по току $\beta = 30$. Тогда для выполнения условия насыщения произведение $30\frac{E}{R_3}$ должно быть больше E/R_1, для чего достаточно, чтобы сопротивление резистора R_3 было меньше $30R_1$.

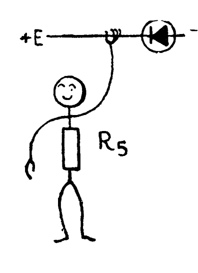


Н. — До сих пор я внимательно следил за тобой, но имеется еще один момент: ты пренебрегаешь токами, которые могут поступать или уходить с баз или коллекторов вследствие зарядов или разрядов конденсаторов.

Л. — Они только упорядочивают работу схемы. Например, когда конденсатор C_1 заряжается через резистор R_2, зарядный ток прибавляется к току, поступающему на базу транзистора T_1 через резистор R_3. Как ты видишь, он просто улучшит положение.

Синхронизация

Л. — А теперь я воспользуюсь диодом $Д_1$, который до сих пор оставался без дела, чтобы подать на коллектор T_1 отрицательный импульс из точки A через конденсатор C_3.



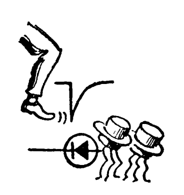
Н. — А какую роль играет резистор R_5?

Л. — Этот резистор просто-напросто устанавливает средний потенциал катода диода $Д_1$ на уровне $+E$. Поэтому диод $Д_1$ может проводить ток только при запертом транзисторе T_1 (потому что это повышает потенциал коллектора транзистора T_1 и потенциал анода диода до уровня $+E$), когда катод этого диода стал отрицательным под воздействием поступающего через конденсатор C_3 импульса.

Н. — Но это ужасно! Если ты таким образом подашь импульс на коллектор транзистора T_1, то полностью нарушишь работу схемы!

Л. — Должен признаться, что именно это я и намерен сделать. Предположим, например, что мультивибратор имеет тенденцию работать с частотой повторения 100 *гц*. Подадим ему в точку A отрицательные импульсы с частотой 330 *гц*. Предположим для начала, что первое срабатывание мультивибратора, совпадающее с резким падением потенциала на коллекторе транзистора T_1, произойдет точно в момент поступления импульса в точку A.

Есть все основания полагать, что, когда в точку A придет следующий импульс, транзистор T_1 еще будет в состоянии насыщения. Поэтому приложенный на катод диода импульс не будет передан. Следующий импульс может застать транзистор T_1 в состоянии насыщения и также не вызовет никакого результата. Третий импульс придет в момент, когда мультивибратор вот-вот самопроизвольно опрокинется; T_1 еще заперт, а база транзистора T_2 почти готова открыться. Этот третий импульс опрокинет мультивибратор на какое-то мгновение раньше, чем он сделал бы это сам. Три периода сигнала с частотой 330 *гц* занимают времени чуть меньше одной сотой доли секунды. Через три следующих импульса картина повторится во всех мельчайших подробностях; поступивший в точку A импульс вызовет опрокидывание мультивибратора немного раньше положенного ему срока. Таким образом наш мультивибратор станет работать несколько



быстрее, чем если бы ему предоставили полную свободу действий. Он станет давать сигналы с частотой 110 *гц*, т. е. с частотой, ровно в 3 раза меньшей приложенной (рис. 80).

Н. — Ну, с этим я не согласен. В первый раз, когда мы применением грубой силы заставим мультивибратор сработать преждевременно, неизбежно произойдет какая-то деформация

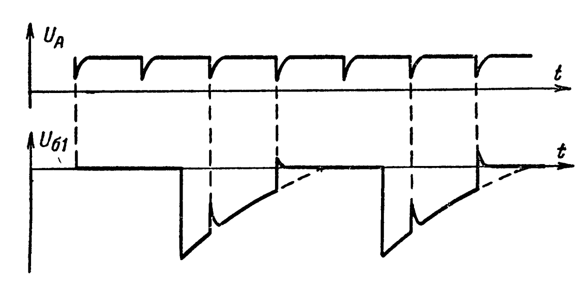
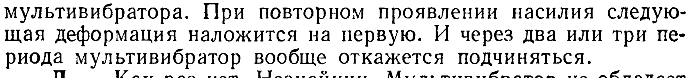
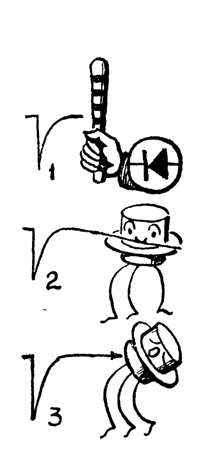


Рис. 80. Подаваемые в точку *А* синхронизирующие импульсы вызывают опрокидывание мультивибратора несколько раньше момента его самопроизвольного опрокидывания. В результате мультивибратор дает сигналы с частотой в 3 раза ниже частоты подаваемых в точку *А* синхронизирующих импульсов.



мультивибратора. При повторном проявлении насилия следующая деформация наложится на первую. И через два или три периода мультивибратор вообще откажется подчиняться.



Л. — Как раз нет, Незнайкин. Мультивибратор не обладает памятью. Каждый раз после срабатывания как самопроизвольного, так и вызванного внешним импульсом, мультивибратор оказывается в строго определенном состоянии, которое не зависит от вызвавшей его опрокидывание причины.

Н. — Если я правильно понял, твой мультивибратор не помнит зла.

Л. — Радиоэлектроника не располагает средствами психоанализа, которые позволили бы определить настроение мультивибраторов. Говоря проще на языке техники, они не имеют запоминающего устройства. Впрочем, это очень полезное для нас свойство.

Стабильность деления

Н. — Это действительно не кажется мне очень сложным. Но что произойдет, если я изменю частоту подаваемых в точку *А* импульсов? Например, если увеличу частоту до 400 *гц*?

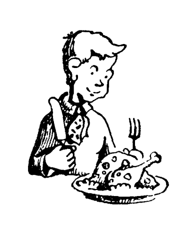
Л. — Может быть, система еще будет действовать, и мультивибратор согласится ускорить ритм своей работы до 400 *гц*: 3 = 133 *гц*. Но может случиться и так, что после опрокидывания синхронно с одним импульсом к моменту прихода следующего импульса мультивибратор еще не станет чувствительным к пусковому импульсу. В этих условиях он не признает третьего импульса и сработает на четвертом, который поступает точно в тот момент, когда мультивибратор должен был опрокинуться самопроизвольно. Тогда система будет делить подаваемую частоту не на три, а на четыре.

Н. — Так значит система не очень стабильна?

Л. — Она стабильна, если не очень сильно изменять подлежащую делению частоту. Такая система не пригодна для деления любой частоты в одно и то же число раз. Если подаваемая на вход частота изменяется в небольших пределах, то ты получишь превосходный делитель частоты.

Н. — Теперь-то я знаю, где мне использовать это устройство; уже давно мне хотелось сделать делитель на 819, чтобы превратить строчную частоту в кадровую [1]. Для этого я сделаю мультивибратор с собственной частотой срабатывания около 25 *гц*, вернее немного меньше (как ты мне объяснил, синхронизация может только ускорить ритм) и подам на него импульсы с частотой строчной развертки.

Л. — Если тебе удастся осуществить свои планы, я готов преподнести тебе в лучшем ресторане фаршированную трюфелями курицу. Но сначала скажи, каким образом намерен ты сделать свой мультивибратор настолько хитрым, что он сработает не на 818-м, а именно на 819-м импульсе? Ведь состояние мультивибратора между этими двумя импульсами изменится настолько незначительно, что для обеспечения стабильности потребуется просто ювелирная регулировка.



Однако сказанное не означает, что сделать делитель, уменьшающий поступающую частоту в 819 раз, невозможно, только делить ее придется в несколько приемов; ты может быть заметил, что 819 представляет собой произведение трех сомножителей: 9, 7 и 13. В первом каскаде ты разделишь свою частоту на 9. Полученные на первом мультивибраторе импульсы подашь на второй, который разделит их частоту на 7; второй каскад соединишь с третьим, который разделит подаваемую ему частоту на 13. И на этой третьей ступени деления ты, вероятно, столкнешься с наибольшими трудностями.

Н. — Если я правильно понял, ты, Любознайкин, просто суеверный человек — ты боишься числа 13...

Л. — Заверяю тебя, что суеверие здесь ни при чем. Я проявил бы еще больше беспокойства, при делении на 15 или 17. Ибо чем выше коэффициент деления, тем труднее осуществить деление; ведь наш мультивибратор не имеет права опрокинуться на двенадцатом импульсе, а обязан наверняка сработать на тринадцатом. В принципе это возможно, хотя и не так легко осуществить. Для подобных делений используют более сложные схемы, о которых сейчас я предпочитаю не говорить, так как это увело бы нас слишком далеко.

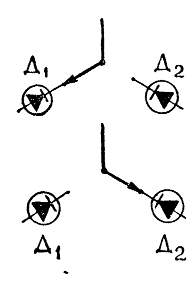
Деление на четное число

Н. — Согласен, спасибо за твои объяснения, но у меня появился один вопрос. Когда ты говорил о числе 13, ты заметил, что еще большее беспокойство вызвало бы у тебя деление на 15 или 17. Почему ты назвал только нечетные числа?

Л. — Очень хорошо, что ты обратил внимание на это обстоятельство. Для деления на четные числа существует очень хитрое устройство, обладающее лучшей стабильностью. Посмотри на схему, которую я начертил для тебя на рис. 81. Я не нарисовал остальную часть мультивибратора; скажу только, что он выполнен очень тщательно для достижения максимальной сим-

---

[1] Во Франции действуют два телевизионных стандарта: передачи первой программы ведутся с разложением на 819 строк, а второй программы — на 625 строк (*Прим. перев.*).



метрии, т. е. чтобы в отсутствии синхронизирующих импульсов оба транзистора в каждый период оставались запертыми строго одинаковое время, и мультивибратор вырабатывал очень симметричные сигналы. Для достижения такой цели стараются сделать в пределах возможного одинаковыми по величине резисторы R_3 и R_4 (см. рис. 78) и конденсаторы C_1 и C_2. Величины R_1 и R_2 имеют меньшее значение.

Н. — Я предполагаю, что ты постараешься также подобрать транзисторы с возможно одинаковыми параметрами.

Л. — Это, конечно, не повредит, но и пользы особой не принесет, так как наши транзисторы при переходе от запертого состояния к состоянию насыщения работают как прерыватели.

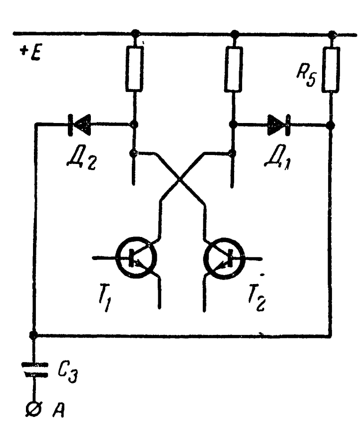


Рис. 81. Включение в схему двух диодов позволяет симметрично подавать сигналы на вход мультивибратора, чтобы синхронизировать каждое опрокидывание схемы и делить подаваемую частоту на четное число.

Предположим, что наш мультивибратор имеет тенденцию работать на частоте примерно 90 *гц*. Подадим ему в точку *A* отрицательные импульсы с частотой 400 *гц*. Они одновременно подаются в катоды диодов $Д_1$ и $Д_2$. Пропустить импульс может только тот диод, чей анод соединен с запертым транзистором. Предположим, что один из этих импульсов опрокинул мультивибратор, заперев транзистор T_1 и приведя в состояние насыщения транзистор T_2. Следующий импульс может дойти до коллектора транзистора T_1, потому что его потенциал равен $+E$. Но этот импульс приходит через 1/400 *сек* после срабатывания мультивибратора, т. е. задолго до момента его очередного самопроизвольного опрокидывания, и если посланный импульс имеет правильно выбранную амплитуду, его окажется недостаточно для переброса схемы. Следующий импульс поступает через 1/200 *сек* после опрокидывания, т. е. незадолго до момента, когда мультивибратор опрокинулся бы самопроизвольно (напомню, что наш мультивибратор симметричный и каждое самопроизвольное опрокидывание происходит точно через 1/180 *сек* после предыдущего). Следовательно, этот второй импульс вызовет срабатывание мультивибратора; в результате транзистор T_1 перейдет в состояние насыщения, а транзистор T_2 будет заперт. Теперь передавать импульсы будет диод $Д_2$. Рассмотренная нами картина начнет повторяться; первый импульс не пройдет, вернее его воздействие не будет иметь последствий, и только следующий после него импульс вызовет новое опрокидывание схемы.

Н. — Но этого не может быть, твой мультивибратор запускается каждым вторым импульсом, т. е. он должен работать с частотой 200 *гц*.

Л. — Не забыл ли ты, дорогой Незнайкин, что полный период работы мультивибратора соответствует двум опрокидываниям. Имеется своего рода опрокидывание «туда» и опрокидывание «обратно». Иначе говоря, вполне нормально, что наш мультивибратор опрокидывается 200 раз в 1 *сек*, а его истинная частота равна 100 *гц*.

Н. — Еще раз я не подумал, как следует! Ты в самом деле прав. Но это чрезвычайно симпатично. Хотя частота делится на 4, мультивибратор запускается каждым вторым поступающим на вход импульсом, что несомненно повышает стабильность его работы.

Л. — Разумеется, и именно поэтому я только что сказал тебе о трудности делить на 13 и тем более на 15 или на 17... А вот разделить на 14 было бы значительно легче, чем на 13.

Деление на 2

Н. — Вот о чем я сейчас подумал: если потребовалось бы разделить частоту на 2, работа была выполнена бы почти безукоризненно, так как мультивибратор срабатывал бы от каждого поступающего на вход импульса.

Л. — Ты совершенно прав, Незнайкин. Но сейчас я расскажу тебе о совершенно безупречном способе деления на 2, который

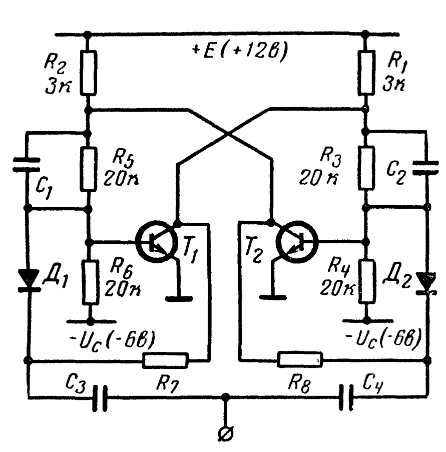
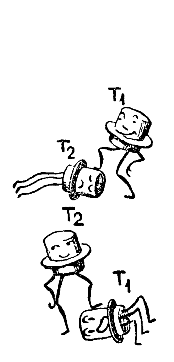


Рис. 82. Схема триггера Экклеса-Джордана, диоды пропускают синхронизирующий импульс на тот из транзисторов, который находится в состоянии насыщения.

никак не зависит от частоты. Я познакомлю тебя с новым устройством — с триггером с двумя устойчивыми состояниями, носящим название триггера Экклеса-Джордана. Вот тебе схема этого устройства (рис. 82).

Н. — Ой, ой! Какая она сложная!

Л. — Может быть и сложная, но разобраться в ней совсем нетрудно. Здесь ты увидишь некоторую аналогию с мультивибратором (см. рис. 78). Когда один из транзисторов пропускает ток, он напряжением своего коллектора воздействует на базу другого транзистора. В отличие от мультивибратора здесь мы имеем прямую связь между каждым коллектором и базой противоположного транзистора. Так, например, если ток пропускает транзистор T_1 (если возможно в состоянии насыщения), потенциал его коллектора очень низкий. С помощью делителя напряжения R_3 — R_4 он придает потенциалу базы T_2 небольшую отрицательную вели-



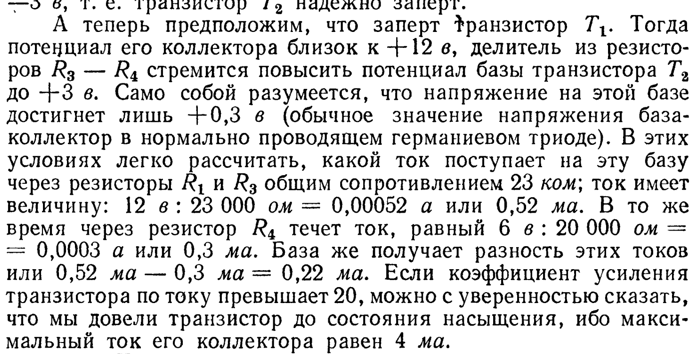
чину, что надежно запирает транзистор T_2. Но когда запертым оказывается транзистор T_1, потенциал его коллектора близок к $+E$ и делитель из резисторов R_3 — R_4 будет стремиться создать на базе T_2 положительное напряжение. Как только база станет положительной, ток базы подрежет сверху напряжение, подводимое к ней через резисторы R_3 и R_4.

Н. — Уф, хоть я и очень внимательно следил за твоим рассказом, числовой пример принес бы мне немалую пользу.

Режимы работы триггера Экклеса-Джордана

Л. — Согласен, я полагаю, что ты будешь доволен, если посмотришь на рис. 82; там в скобках я указал напряжение питания $+E$, равное 12 *в*, напряжение смещения — U_c (в нашем случае — 6 *в*), а также номиналы резисторов. Предположим, что ток пропускает транзистор T_1, находящийся в состоянии насыщения. Отсюда следует, что потенциал его коллектора упал почти до нуля, а ток коллектора близок к 4 *ма*, потому что питание на этот коллектор подается от источника с напряжением 12 *в* через резистор R_1 с сопротивлением 3 *ком*. Два равные по сопротивлению резистора R_3 и R_4 создадут на базе T_2 потенциал, близкий к —3 *в*, т. е. транзистор T_2 надежно заперт.





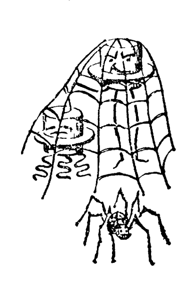
А теперь предположим, что заперт транзистор T_1. Тогда потенциал его коллектора близок к $+12$ *в*, делитель из резисторов R_3 — R_4 стремится повысить потенциал базы транзистора T_2 до $+3$ *в*. Само собой разумеется, что напряжение на этой базе достигнет лишь $+0,3$ *в* (обычное значение напряжения база-коллектор в нормально проводящем германиевом триоде). В этих условиях легко рассчитать, какой ток поступает на эту базу через резисторы R_1 и R_3 общим сопротивлением 23 *ком*; ток имеет величину: 12 *в* : 23 000 *ом* = 0,00052 *а* или 0,52 *ма*. В то же время через резистор R_4 течет ток, равный 6 *в* : 20 000 *ом* = = 0,0003 *а* или 0,3 *ма*. База же получает разность этих токов или 0,52 *ма* — 0,3 *ма* = 0,22 *ма*. Если коэффициент усиления транзистора по току превышает 20, можно с уверенностью сказать, что мы довели транзистор до состояния насыщения, ибо максимальный ток его коллектора равен 4 *ма*.

Н. — Хорошо, теперь я действительно вижу, что когда один из транзисторов твоей схемы пропускает ток, он запирает другой и, наоборот, запертый транзистор приводит другой в состояние насыщения. Но как узнать, какой из транзисторов будет заперт и какой будет находиться в состоянии насыщения?

Л. — А на этот вопрос, дорогой Незнайкин, я не могу ответить с желаемой тобой определенностью. Возможно, что запертым будет транзистор T_1, а T_2 будет в состоянии насыщения, но одинаково возможен и случай, что в состоянии насыщения окажется T_1, а T_2 будет заперт.

Н. — Значит, твоя схема сама не знает, чего она хочет!

Л. — Не вдаваясь в вопросы психологического анализа, я просто скажу тебе, что рассматриваемая схема имеет два устойчивых состояния или, как говорят, она бистабильна. Тебе уж доводилось встречаться с такими схемами и, в частности, с триггером Шмитта (см. рис. 61), у которого напряжение базы транзистора T_1 находилось между двумя порогами.



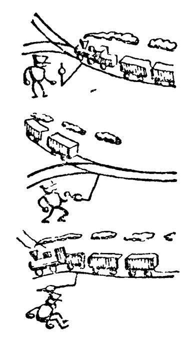
Н. — Так, значит, эта схема может некоторое время провести с запертым T_1 и насыщенным T_2 и наоборот.

Л. — Согласен с тобой, но с одной оговоркой — я не стал бы говорить «некоторое время». Оказавшись в каком-то определенном положении, схема (рис. 82) может бесконечно долго оставаться в этом положении, пока мы не изменим ее состояния.

Н. — Но как ты «изменишь состояние» схемы?

Л. — Здесь на сцену выступают диоды $Д_1$ и $Д_2$. Предположим, что схема находится в таком состоянии, когда транзистор T_1 заперт, а T_2 насыщен. Как мы видим, в этих условиях на катоды диодов через резисторы R_7 и R_8 поданы следующие потенциалы: у диода $Д_1$ почти $+12$ *в*, а у диода $Д_2$ почти нуль. Подадим в точку A отрицательный импульс; через конденсаторы C_3 и C_4 этот импульс одновременно будет приложен к катодам обоих диодов. Но так как катод диода $Д_1$ имеет потенциал $+12$ *в*, а его анод — отрицательный потенциал (транзистор T_1 заперт), потребовался бы импульс больше 12 *в*, чтобы сделать диод $Д_1$ проводящим. А у диода $Д_2$ потенциал катода равен (или почти равен) нулю, а потенциал его анода также близок к нулю или имеет очень небольшую положительную величину (мы говорили о 0,2 или 0,3 *в*). Поэтому импульс будет передан только диодом $Д_2$. Отрицательный импульс, попадая на базу транзистора T_2, запрет его. Соответствующее повышение напряжения на его коллекторе передается на базу транзистора T_1 через делитель из резисторов R_5—R_8 и особенно через конденсатор C_1, хорошо передающий крутые фронты, и отопрет транзистор T_1. Таким образом, завершится переход системы из одного состояния в другое.

Н. — Хорошо, до сих пор все понятно. Но следующий импульс произведет такой же эффект. А для возвращения схемы в первоначальное состояние ему нужно было бы сделать как раз обратное

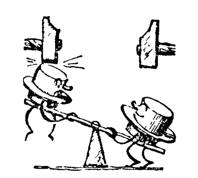


Л. — Как мне кажется, дорогой Незнайкин, ты забыл, что транзистор T_1 стал проводить ток, а транзистор T_2 в это время заперся Следовательно, после опрокидывания схемы резистор R_7 постепенно сделает потенциал анода диода $Д_1$ близким к нулю; а в это время резистор R_8 постепенно повысит потенциал катода диода $Д_2$ до величины, близкой к $+12$ *в*. Если прежде, чем посылать следующий импульс, ты немного подождешь, то увидишь, что картина с напряжениями смещения на катодах диодов стала обратной по сравнению с состоянием, предшествовавшим первому импульсу. Следовательно, второй импульс произведет обратное действие и вернет схему в ее первоначальное состояние.

Н. — Дьявольски хитрая система. По сути дела диоды $Д_1$ и $Д_2$ играют роль железнодорожной стрелки, направляющей импульс на тот транзистор, который как раз в нем нуждается для отпирания.

Л. — Ты совершенно прав, сравнивая это устройство с железнодорожной стрелкой. Но хочу, чтобы ты обратил особое внимание на роль, которую в этой стрелке играют резисторы R_7 и R_8, а также конденсаторы C_3 и C_4. После опрокидывания схемы изменение потенциалов катодов диодов $Д_1$ и $Д_2$ происходит постепенно. В самом деле для заряда конденсатора C_3 через резистор R_7 и конденсатора C_4 через резистор R_8 требуется некоторое время. Иначе говоря, работой нашего направляющего разделителя управляет предыдущее положение триггера. Запаздывание в цепочках R_7 — C_3 и R_8 — C_4 играет исключительно важную роль; если вернуться к твоему сравнению с железной дорогой, задержка не позволяет перевести стрелку во время прохождения поезда.

Н. — Однако ничего подобного нет в схеме на рис. 81, где диоды играют роль аналогичного направляющего разделителя...



Диоды, которые не выполняют роли направляющего разделителя

Л. — Совсем не так, Незнайкин; ты совершаешь очень распространенную ошибку, но мне не хотелось бы, чтобы ты уподобился всем... В схеме на рис. 81 диоды $Д_1$ и $Д_2$ не предназначены для выполнения роли направляющего разделителя. Перед ними поставлена только одна цель — пропустить на один из коллекторов отрицательный импульс, который должен вызвать опрокидывание схемы, после чего диоды как бы отключают этот

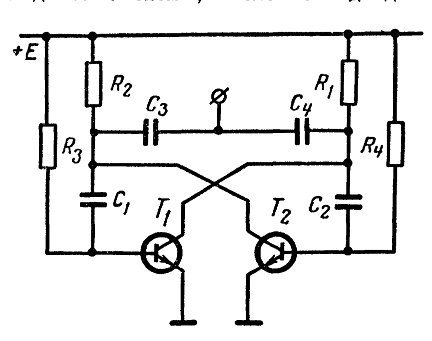


Рис. 83. Для деления частоты на четное число мультивибратор делают по возможности максимально симметричным и синхронизируют импульсом, подаваемым через два конденсатора, включенных в цепи коллекторов транзисторов.

коллектор от источника импульсов. При необходимости в схеме на рис. 81 можно было бы обойтись без диодов и посылать импульсы из точки A просто через два небольших конденсатора C_3 и C_4 (рис. 83)...

Н. — О, нет! В этом случае ты не сможешь посылать импульсы только на коллектор запертого транзистора, они одновременно пошли бы и на другой.

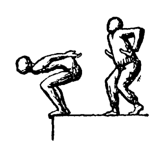
Л. — Но что может сделать отрицательный импульс, попавший на коллектор насыщенного транзистора, Незнайкин? Эффект будет примерно такой, как если поставить горчичники на деревянную ногу. Получивший такой импульс коллектор передаст его на базу запертого транзистора, но ведь это не сможет запереть еще больше. Только запертый транзистор чувствителен к поступающему на его коллектор отрицательному импульсу: он через конденсатор связи передаст его на базу транзистора, находящегося в состоянии насыщения, и тем самым начнет опрокидывание схемы.

Н. — Но тогда почему ты поставил в схему конденсатор C_3, резистор R_5 и два весьма дорогих диода $Д_1$ и $Д_2$. Ведь можно было бы вполне обойтись двумя конденсаторами.



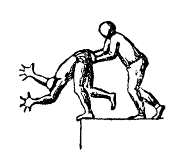
Л. — Для начала разберемся с ценой. Должен тебе сказать, что хороший диод стоит не дороже конденсатора. Затем я поставил здесь диоды, чтобы мультивибратор лучше работал. Наличие двух конденсаторов, соединяющих точку A с коллекторами транзисторов для подачи отрицательных импульсов, может нарушить нормальную работу мультивибратора. При использовании же двух диодов, установленных, как показано в схеме на рис. 81, все обстоит иначе: проводящий первым диод передает импульс на коллектор соответствующего транзистора, а после опрокидывания схемы диод запирается. Все происходит так, как если бы в этот момент его отключили от источника импульсов.

Н. — Так, значит, диоды просто выполняют роль прерывателя. Тогда их можно было бы заменить двумя маленькими переключателями и перебрасывать их после прохождения импульса.



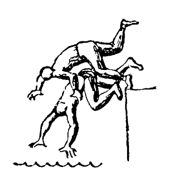
Л. — В принципе, да. Но если ты сумеешь переводить свои переключатели с точностью до четверти микросекунды и в случае надобности проделывать эту операцию 20 000 раз в 1 *сек*, я настоятельно советую тебе бросить свою работу и поступить в цирк.

Н. — Понятно! Но еще одна вещь не дает мне покоя; разве в схеме на рис. 82 твои направляющие диоды $Д_1$ и $Д_2$ не играют той же роли отключателя источника импульсов от триггера?



Л. — Ты совершенно прав, эти диоды одновременно направляют импульсы по нужному адресу и отключают источник импульсов от триггера. А в схемах на рис. 78 и 81 диоды только отключают источник импульсов от сработавшей схемы. Для большей наглядности я приведу аналогичный пример из механики. Представь себе, что с трамплина один за другим прыгают в воду пловцы, а тренер «синхронизирует», подталкивая их сзади, чтобы заставить прыгнуть немного раньше назначенного момента...

Н. — Но результат окажется катастрофическим для несчастного, который окажется в воде раньше, чем думал!



Л. — Успокойся! Речь идет о совсем ничтожном опережении, и пловец уже готов прыгнуть в воду. Рассмотрим теперь, как действует тренер. Он толкает пловца вперед до тех пор, пока тот не кувыркнется вниз. Следовательно, между тренером и пловцом необходима односторонняя механическая «связь». Иначе говоря, тренер должен толкать пловца, но не давать ему тащить себя. Если вместо того, чтобы толкать пловца сзади, тренер будет крепко держать его за плечо, станут возможны два варианта: или тренер очень силен и не даст пловцу спрыгнуть в воду, или же пловец увлечет тренера с собой и тот полетит в воду...

Н. — И превосходно сделает!



Л. — Не отвлекайся, Незнайкин. Пойми, что в этом случае, как и при опрокидывании мультивибратора, необходимо, чтобы связь работала только в одном направлении и чтобы она прерывалась сразу же после начала опрокидывания. Эту роль всегда выполняют диоды; в некоторых случаях, как, например, в схеме на рис. 82, они выполняют также роль направляющего разделителя.



Опрокидывание триггера Экклеса-Джордана

Н. — Я полагаю, что теперь мы о нем все рассказали. Каждый раз, когда в точку *А* поступает импульс, схема изменяет свое состояние, следовательно, потребуется подать в точку *А* два импульса, чтобы схема вернулась в свое первоначальное состояние.

Л. — Превосходно, ты совершенно правильно понял принцип работы этого устройства. Как ты видишь, такая система может использоваться для деления любой частоты на 2. Поэтому устройство называют апериодическим делителем частоты. Если сигналы с коллекторов этой схемы преобразовать дифференцирующей схемой такого типа, как изображенная на рис. 64, и использовать для пуска в ход другого триггера с двумя устойчивыми состояниями, то в результате частота будет разделена на 4. Как ты видишь, таким образом можно легко разделить частоту на 4, 8, 16, 32...

Н. — Наиболее важным в этом многоступенчатом устройстве мне представляется первый делитель, так как, вероятно, от него зависит максимальная частота, на которой может работать все устройство. Какими характеристиками обычно обладает такой делитель?

Л. — По изображенной на рис. 82 схеме легко сделать триггер, работающий на частотах до 5 или 6 *Мгц*. А путем подбора транзисторов и используя резисторы с меньшими, чем я назвал, номиналами, удается делить частоты до 30 *Мгц*.

Обрати внимание, до какой степени эта система отвечает требованиям, которые можно предъявить к совершенному делителю. тот же самый триггер, который получая 30 миллионов импульсов в секунду, дает на выходе сигнал с 15 миллионами периодов в секунду, работает точно так же и при получении в секунду четырех импульсов — он даст выходной сигнал с частотой 2 *гц*.

Н. — Исключительно приятное устройство, но как досадно, что оно делит только на 2 (или на 4, 8, 16...).

Л. — Существуют системы с несколькими устойчивыми положениями, которые позволяют также безупречно делить не на 2, а на 3, 4, 5 и даже на другие числа. Системы эти основаны на тех же принципах, что и схема на рис. 82. Но они немного сложнее, и мы рассмотрим их позднее, когда поведем беседу о счетных устройствах

Н. — Бедный я, несчастный! Твой триггер Экклеса-Джордана уже достаточно сложен, а если ты покажешь мне что-нибудь еще более сложное, боюсь, что моя голова не выдержит!

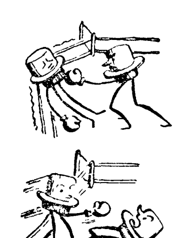
Л. — Не бойся, Незнайкин; усложнять материал мы будем постепенно, и ты убедишься, что на самом деле все намного проще, чем может показаться при взгляде на схему.

Н. — Хорошо, надеюсь, что так и будет. Должен признаться, что мне легче понять новую схему, когда ее можно сравнить с чем-нибудь мне уже знакомым. Впрочем я вижу некоторую аналогию между твоим триггером Экклеса-Джордана на рис. 82 и мультивибратором на рис. 78. Основное различие между ними заключается в том, что в мультивибраторе связь между коллектором и базой противоположного транзистора осуществляется конденсаторами, тогда как в триггере Экклеса-Джордана цепочка прямой связи состоит из резистивных делителей.

Однотактный триггер

Л. — Ты совершенно прав, Незнайкин. Я вижу, что сегодня ты в прекрасной форме, и поэтому я расскажу тебе о новом типе схемы, которую можно рассматривать как своеобразную дочь схем на рис. 82 и 78. Новую схему я начертил для тебя на рис. 84.

Н. — Очень любопытная схема; транзистор T_1 связан с транзистором T_2 делителем R_3 — R_4, как в триггере Экклеса-Джордана, а коллектор транзистора T_2 связан с базой транзистора T_1 конденсатором C как в мультивибраторе с рис. 78. Так что же это: генерирующая или бистабильная схема?



Л. — Ни то, ни другое. Мультивибратор (рис. 78) относится к категории так называемых неустойчивых схем, т. е. схем, которые не могут оставаться в каком-либо состоянии: они выходят из этого состояния резким скачком, который возникает самопроизвольно или ускоряется внешним пусковым импульсом. Изображенная на рис. 84 схема обладает одним состоянием, в котором она может пребывать бесконечно долго. Это состояние наступает, когда ток транзистора T_1 доходит до насыщения, запирая транзистор T_2, т е так, как это происходит в триггере Экклеса-Джордана.

Н. — Но тогда это будет схема с двумя устойчивыми состояниями!

Л. — Нет, Незнайкин, эта схема не с двумя, а с одним устойчивым состоянием — ее называют однотактным триггером. В самом деле, если в точку A поступает отрицательный импульс, он через конденсатор C' передается на катод диода $Д$. Через этот диод и конденсатор C импульс будет стремиться запереть транзистор T_1. Как только ток этого транзистора начинает снижаться, происходит повышение потенциала его коллектора (уменьшается

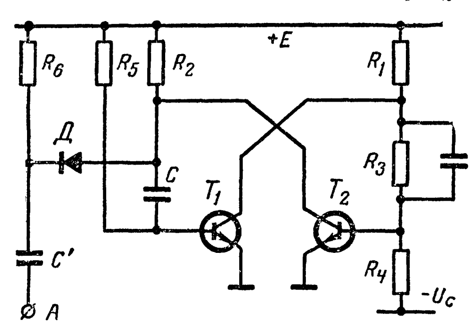
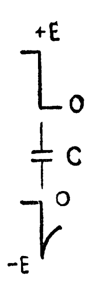


Рис. 84. Схема с одним устойчивым состоянием представляет собой своеобразную смесь мультивибратора и схемы с двумя устойчивыми состояниями; ее можно опрокинуть подачей импульса в точку A, но затем схема самопроизвольно возвращается в первоначальное состояние.

падение напряжения на резисторе R_1). Это повышение потенциала передается на базу транзистора T_2, который начинает пропускать ток. Потенциал коллектора транзистора T_2 снижается, это снижение через конденсатор C передается на базу T_1 и усиливает воздействие первоначального импульса до тех пор, пока ему не удастся полностью запереть транзистор T_1 и ввести в состояние насыщения транзистор T_2.

Н. — А я что говорил — вот тебе второе устойчивое состояние!

Л. — Нет, это состояние не может удерживаться бесконечно долго. Не забывай, что теперь потенциал базы T_1 отрицательный. Через резистор R_5 пойдет ток, он будет стремиться повысить потенциал базы транзистора T_1 и одновременно разрядить конденсатор C. Как только потенциал базы транзистора T_1 станет слегка положительным, через транзистор T_1 потечет ток и потенциал его коллектора снизится, что приведет к уменьшению тока транзистора T_2, а это в свою очередь вызовет повышение потенциала на коллекторе транзистора T_2. Это повышение, переданное через конденсатор C на T_1, ускорит происходящую в схеме эволюцию, в результате чего транзистор T_1 вновь придет в состояние насыщения, а транзистор T_2 окажется запертым.



Н. — Это дьявольски сложно. Все явления происходят одновременно и к тому же воздействуют друг на друга, поэтому я с большим трудом проследил за ними.

Сигналы однотактного триггера

Л. — Для облегчения твоей задачи я вычертил на рис. 85 кривые, характеризующие изменения во времени потенциалов в различных элементах схемы. Как мы видим, в точку A в момент t_0 подают отрицательный импульс. В этот момент потенциал кол-

лектора транзистора T_1 стремится повыситься до $+E$. Это повышение через цепочку R_3 — R_4 передается на базу транзистора T_2, которая сначала была заперта напряжением — U, а теперь ее потенциал поднимается до нуля. Как ты видишь, это вызывает отпирание транзистора T_2 и доводит потенциал его коллектора почти до нуля.

Снижение потенциала коллектора T_2 через конденсатор C передается на базу T_1 (первоначально ее потенциал был почти равен нулю) и доводит потенциал базы до величины, близкой к — E.

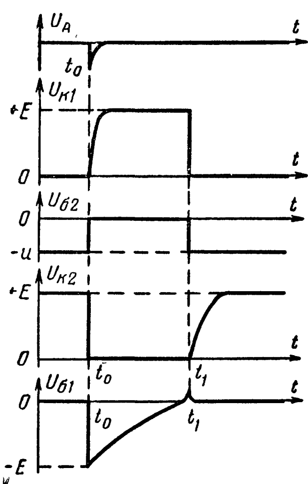
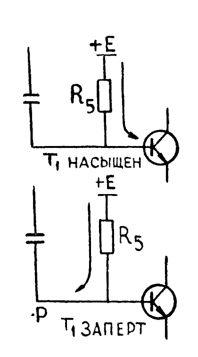


Рис. 85. Эпюры напряжений в схеме с одним устойчивым состоянием, изображенной на рис. 84.

Н. — Я хотел бы знать, откуда берется эта величина — E?

Л. — Но, Незнайкин, разве ты забыл известный принцип, что напряжение на выводах конденсатора не может измениться на конечную величину за равное нулю время. Если ты об этом вспомнишь, то увидишь, что перед самым приходом отрицательного импульса в точку A потенциал коллектора T_2 был равен $+E$ (транзистор T_2 был заперт). Потенциал базы транзистора T_1 был почти равен нулю. Следовательно, конденсатор C был заряжен до напряжения, очень близкого E. Сразу же после опрокидывания схемы он еще был заряжен до напряжения E. При этом потенциал на нижней (базовой) обкладке равен — E относительно верхней. Затем потенциал его верхней обкладки стал близким нулю (транзистор T_2 в состоянии насыщения замкнул верхнюю обкладку на корпус) и, следовательно, потенциал базы T_1, равный потенциалу нижней обкладки относительно верхней, стал близким —E.

Н. — Признаюсь, что я не подумал о твоем знаменитом принципе, так как забыл вырезать его золотыми буквами на своем камине, но поверь мне, теперь за этим дело не станет. По твоим кривым я вижу, что сразу же после опрокидывания схемы потенциал базы транзистора T_1 начинает повышаться. Я полагаю, что причиной послужил ток, протекающий по резистору R_5



Л. — И ты не ошибся. Когда транзистор T_1 находится в состоянии насыщения, проходящий по резистору R_5 ток течет по направлению к базе этого транзистора. А теперь при запертом транзисторе T_1 добавляется ток разряда конденсатора C. Через время, определяемое величиной CR_5, потенциал базы транзистора T_1 доходит почти до нуля — это происходит в момент t_1. Как ты видишь, в этот момент транзистор T_1 вновь начинает пропускать ток; потенциал его коллектора падает до нуля, что приводит к запиранию транзистора T_2, потенциал коллектора которого повышается до $+E$.

Н. — А почему ты, Любознайкин, на своем рисунке на кривой потенциала коллектора T_2 изобразил участок возрастания относительно пологим?

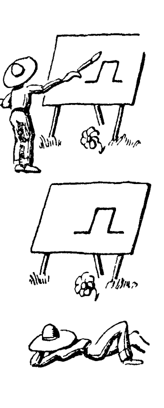
Л. — Не забывай, что для повышения потенциала коллектора T_2 протекающий по резистору R_2 ток должен сначала заря-

дить конденсатор C. На нижней обкладке последнего переход база-эмиттер проводящего транзистора поддерживает потенциал, почти равный нулю. Следовательно, этот конденсатор заряжается постепенно и вслед за ним медленно повышается потенциал коллектора T_2.

Н. — Я начинаю понимать работу твоей занятной схемы. И все же она производит очень странное впечатление. Стоит только транзистору T_2 начать пропускать ток, как его опять очень быстро запирают. Он должно быть чувствует себя обманутым.

Л. — Отложи, пожалуйста, на более подходящее время психологический анализ чувств транзисторов, а пока займись вопросом практического использования схемы, которая во многих случаях может оказаться очень полезной.

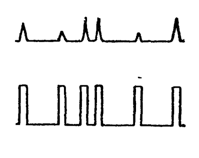
Использование однотактных триггеров



Н. — Но мы сейчас имеем дело не с мультивибратором, так как наша схема только один раз работает как мультивибратор.

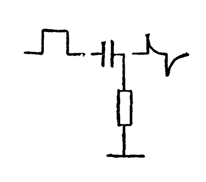
Л. — И это очень хорошо. Первое опрокидывание схемы производится внешним импульсом, а второе происходит самопроизвольно, поэтому эту схему можно назвать одновибратором. Впрочем, иногда встречается и название «однотактный мультивибратор». Но это название бросает меня в дрожь, потому что содержит в себе противоречие. С таким же успехом можно говорить о темном свете или металлическом ксилофоне[1]. Эта схема интересна тем, что при любом пришедшем в точку A импульсе при условии, что он достаточен для срабатывания схемы, с коллектора транзистора T_1 получают единственный сигнал, всегда одинаковый по длительности и амплитуде. Следовательно, эта схема прекрасный инструмент для преобразования импульсов с целью придания им единой формы. Ты, вероятно, помнишь, что счетчик Гейгера-Мюллера дает совершенно разные по форме импульсы. Подав такие импульсы на однотактный триггер, например, изображенный на рис. 84, мы можем сделать их совершенно идентичными, что помимо других преимуществ, в частности, облегчает их счет.

Н. — На мой взгляд проще пропустить их через амплитудный ограничитель.



Л. — Но полученный результат был бы существенно хуже. Ведь данный счетчиком Гейгера-Мюллера очень высокий импульс одновременно больше других и по продолжительности, потому что в этом случае деионизация трубки занимает больше времени. При использовании простого амплитудного ограничителя мы получили бы импульсы одинаковой высоты, но разной ширины. Впрочем, есть еще одна весьма интересная область применения для нашего однотактного триггера. Представь себе, что напряжение с коллектора транзистора T_1 подается на дифференцирующую схему, которая, например, приведена на рис. 64. Что случится, если конденсатор C и резистор R взять с довольно малыми номиналами?

Н. — Если я не забыл твоих объяснений, на выходе этой схемы мы получим положительный импульс в момент t_0 (рис. 86), т. е. когда потенциал коллектора T_1 резко повышается, а затем



---

[1] Название ударного музыкального инструмента ксилофона образовано из греческих слов «ксилон» — дерево и «фоне» — голос (*Прим. перев.*).

отрицательный импульс в момент t_1, когда транзистор T_1 вновь отпирается, и потенциал его коллектора резко падает.

Л. — Незнайкин, ты все меньше и меньше соответствуешь своему имени! Сказанное тобой абсолютно правильно. Предположим, что в этих условиях я с помощью диода уберу положительный импульс, останется только отрицательный импульс, появляющийся в момент t_1. Такой импульс задержан относительно пускового импульса на время, величина которого зависит только от резисторов и конденсаторов схемы (рис. 84). Таким образом, мы сделали схему задержки импульсов: если подать импульс в точку A, то из нашего устройства импульс выйдет с хорошо известной задержкой, длительность которой можно изменять от долей микросекунды до нескольких секунд путем соответствующего подбора элементов схемы.

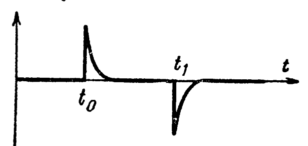


Рис. 86. Подавая сигнал с коллектора транзистора T_1 схемы с одним устойчивым состоянием на дифференцирующую схему, можно получить отрицательный импульс в момент t_1 с некоторой задержкой по сравнению с пусковым импульсом.



Н. — Ну, за это изобретение я тебя поздравлять не собираюсь! Мы постоянно слышим, что радиоэлектронике свойственна быстрота, а ты изобрел способ создавать опоздания — ты идешь против прогресса.

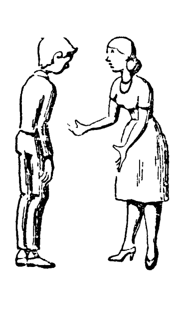
Применение устройств задержки



Л. — Незнайкин, не играй словами. При выполнении последовательного ряда операций довольно часто бывает необходимо задержать сигнал на регулируемый отрезок времени. К такому методу, в частности, прибегают, когда с помощью сигнала хотят иметь систему единого времени для включения изучаемого процесса и начала развертки осциллографа, предназначенного для наблюдения этого процесса. Сигнал включают с определенной задержкой, а осциллограф — без задержки. Благодаря этому мы можем превосходно следить за процессом по экрану осциллографа, так как его развертка включается до начала процесса.

Н. — Скажи, пожалуйста, Любознайкин, а не разумнее было бы включить осциллограф с некоторым опережением относительно явления, чем задерживать начало явления?

Л. — Тогда, Незнайкин, открой мне секрет «схемы опережения», где следствие появляется раньше причины, его породившей, т. е. способной давать импульс на выходе раньше, чем был подан импульс на ее вход, и я гарантирую тебе, во-первых, всемирную известность, а затем крупный успех в академических кругах!



Н. — Правильно, а я об этом не подумал. Значит, опережающему осциллографу предпочитают отстающее явление... положительно все относительно в нашем подлунном мире.

Л. — Я позволю себе спуститься из высоких философских сфер на нашу бренную землю, чтобы напомнить тебе, что уже довольно поздно. Я не хотел бы стать причиной язвительного объяснения Поленьки с тобой...

Н. — Ты совершенно прав, и мы продолжим нашу беседу в следующий раз.

■

Беседа девятая

Наш молодой друг желает все же навести порядок в сигналах (а также в своих идеях ...). Поэтому он старается разобраться, как можно различать, т. е. разделять сигналы по частоте, амплитуде и длительности. Он убеждается, что история про кошку с котятами разъясняет проблему амплитудных селекторов.

Выделение сигналов

Незнайкин — Подвергшиеся твоим изощренным пыткам сигналы отличаются исключительным разнообразием форм, и теперь, дорогой Любознайкин, нам, вероятно, будет довольно сложно среди них ориентироваться.

Любознайкин — Не очень, импульсы ты не спутаешь с синусоидами; достаточно взглянуть на экран осциллографа, чтобы установить, с какими сигналами мы имеем дело.

Н. — Согласен, но для этого всегда требуется человек, который смотрел бы на осциллограф. А нельзя ли для разделения сигналов устроить автоматическую сортировку?

Л. — Разумеется, можно. И я вижу, что пришло время поговорить о дискриминаторах.



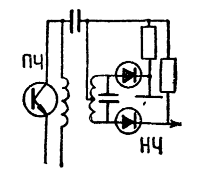
Н. — Для чего нужны эти сооружения?

Л. — Речь идет всего-навсего о схемах, способных обнаружить изменения той или иной характеристики сигнала. Так, например, частотный дискриминатор выдает на выходе положительное или отрицательное напряжение, если частота подаваемых на его вход сигналов оказывается выше или ниже заданной частоты, определяемой свойствами самого дискриминатора.

Дискриминатор

Н. — А, правильно, ведь я же должен был вспомнить. Дискриминатором называют систему, которая в радиоприемниках с частотной модуляцией заменяет классические детекторы приемников с амплитудной модуляцией. Следовательно, это устройство я знаю.

Л. — В самом деле, названные тобой дискриминаторы широко используют в радиоприемниках. В радиоэлектронной аппаратуре промышленного назначения частотные дискриминаторы обычно используют для обнаружения изменения частоты с совершенно иной, чем в радиоприемнике ЧМ сигналов, целью. Так, например, щуп измерителя толщины заставляют воздействовать на подвижную обкладку конденсатора, включенного в колебательный контур. Об использовании такого датчика, как ты, вероятно, помнишь, мы уже говорили. Колебательный контур является частью генератора, вырабатывающего сигнал, частота которого изменяется в зависимости от перемещения подвижной обкладки конденсатора. Переменное напряжение с изменяющейся частотой подается на вход дискриминатора, напряжение на выходе которого изменяется в соответствии с положением подвижной обкладки.



Н. — Значит, такая система всегда дает большее или меньшее напряжение в зависимости от входной частоты?

Л. — Возможны и устройства другого типа. Например, у тебя может возникнуть потребность в системе, которая получила бы на общем входе сигналы разной частоты и распределяла бы эти сигналы по различным каналам... в зависимости от того, какой частоты сигналы для какого канала требуются.

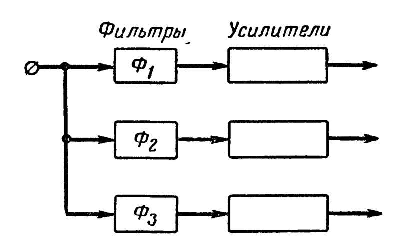
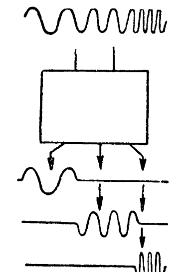


Рис. 87. В зависимости от частоты входного сигнала фильтры направляют его на различные усилители. Так происходит разделение сигналов по частоте.



Н. — Должно быть такую систему дьявольски сложно сделать!

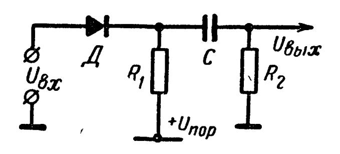
Л. — Совсем нет, наоборот очень даже просто. Достаточно сделать несколько избирательных усилителей (рис. 87), снабдить каждый из них соответствующим фильтром, настроенным на определенную полосу частот, и одновременно на все подать общий входной сигнал. Полосы пропускания фильтров не перекрывают друг друга, а размещаются рядом, поэтому входной сигнал будет направлен в соответствующие частотные каналы; таким образом можно рассортировать сигналы по частоте.

Амплитудная селекция

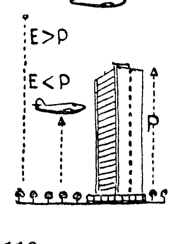
Н. — А можно ли сделать устройство для сортировки сигналов по амплитуде?

Л. — Это совсем не сложно, можно воспользоваться схемами амплитудных ограничителей, которые я нарисовал для тебя на рис. 53, 54 и 55; потребуется лишь внести некоторые изменения. Рассмотрим в качестве примера изображенную на рис. 88 схему.

Рис. 88. На выход схемы импульс $U_{\text{вых}}$ проходит только в том случае, если на вход ее подают импульс $U_{\text{вх}}$ с пиковым напряжением, большим $+U_{\text{пор}}$.



Она даст выходное напряжение лишь в том случае, если входное напряжение $U_{\text{вх}}$ превышает величину $+U_{\text{пор}}$. До тех пор пока $U_{\text{вх}}$ меньше $+U_{\text{пор}}$, диод заперт.



Н. — А для чего понадобились конденсатор C и резистор R_2?

Л. — Они служат для устранения постоянной составляющей, появляющейся на катоде диода в результате подачи порогового напряжения $+U_{\text{пор}}$.

Н. — Тогда очень легко разослать по разным направлениям сигналы с разной амплитудой. Достаточно сделать несколько устройств по твоей схеме (рис. 88) на возрастающие ступеньками значения $+U_{\text{пор}}$ и в каждом канале получим строго заданные напряжения.

Л. — В самом деле разделение сигналов по амплитуде производится таким методом, но задача несколько сложнее, чем ты думаешь. Представь себе, что мы сделали пять устройств по приведенной на рис. 88 схеме, рассчитанные на пороговые напряжения + $U_{пор}$ соответственно 2, 4, 6, 8 и 10 *в*. Входной сигнал мы одновременно подадим на все соединенные между собой аноды диодов. Само собой разумеется, что катод диода с порогом + 10 *в* пропустит сигнал на вход лишь в том случае, когда входное напряжение превышает 10 *в*. Точно также и катод диода с порогом +6 *в* пропустит лишь сигналы с амплитудой больше 6 *в*. Но может случиться так, что нам понадобится направить в канал сигнал лишь тогда, когда напряжение на входе, например, находится в пределах от +6 до +8 *в*.

Н. — Но я не вижу никакой проблемы. Этот сигнал мы получим на катоде диода с порогом +6 *в*.

Л. — Незнайкин, ты сейчас напомнил мне одного моего друга. У него была кошка, которую он очень любил и для удобства которой устроил в нижней части двери кошачий лаз, т. е. достаточно большое отверстие, чтобы кошка могла свободно пройти через него. Но однажды его любимица окотилась, и мой друг, желая дать возможность котятам также легко выходить из квартиры, решил сделать рядом с основным лазом несколько других меньшего размера...



Н. — Я не вижу, какое отношение эта история имеет к теме нашей беседы, но уж раз мы начали говорить о твоем приятеле, должен заметить, что маленькие лазы совершенно не нужны, так как котята могут пройти через уже имеющийся вслед за своей матерью...

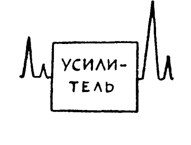
Л. — Ты это сам сказал, Незнайкин. Катод диода с порогом +6 *в* пропустил сигнал, когда входное напряжение превысит 6 *в*, но он не задержит сигнал, когда входное напряжение превысит и 8 *в*.

Н. — Ах! Как я об этом не подумал! Но тогда я совсем не вижу выхода.

Многоканальный селектор

Л. — Успокойся, положение не безвыходное. Выделить сигналы с амплитудой от 6 до 8 *в* можно с помощью схем, носящих название схем несовпадения, которые приводятся в действие сигналами с катода с порогом +6 *в* и запираются сигналами с катода с порогом +8 *в*.

Н. — Согласен, но ты решил проблему, как по мановению волшебной палочки. Что это за схемы несовпадения, о которых я никогда ничего не слышал?



Л. — Такие схемы отличаются исключительным разнообразием. Например, систему для получения нужных сигналов можно установить на выходе диода с порогом +8 *в*. Такой системой, в частности, может послужить одновибратор (схема с одним устойчивым состоянием), срабатывающий, когда сигнал превышает 8 *в*. Сигнал этого одновибратора будет запирать усилитель, на вход которого обычно подается сигнал с катода диода с порогом +6 *в*. Таким образом, этот усилитель будет работать только тогда, когда входной сигнал превышает 6 *в* (на его вход может пройти лишь сигнал с амплитудой больше 6 *в*, но менее 8 *в*). Сигналы более 8 *в* вызывают срабатывание однотактного триггера, который запирает усилитель.



Н. — Я начинаю понимать, но я бы хотел, чтобы ты внес ясность по двум возникшим у меня вопросам. Во-первых, почему

ты поставил однотактный триггер на выходе диода с порогом $+8$ *в*; во-вторых, как делают такой запираемый усилитель?

Л. — Этот одновибратор я использовал только для того, чтобы получить напряжение, изменяющееся от «ничего» до «всего», когда диод с порогом $+8$ *в* начинает пропускать ток. Если для запирания усилителя я воспользовался бы непосредственно сигналом с катода этого диода, то запирание происходило бы более или менее энергично в зависимости от того, насколько входное напряжение превышает 8 *в*. Одновибратор здесь используется для придания запирающему сигналу соответствующей формы и величины, так сказать для стандартизации импульсов. Уже при малейшем превышении входным напряжением 8 *в* одновибратор дает сигнал заданной формы и величины.

Запираемый усилитель можно сделать по схеме, которую я начертил на рис. 89 Как ты видишь, транзистор T_1 обычно нахо-

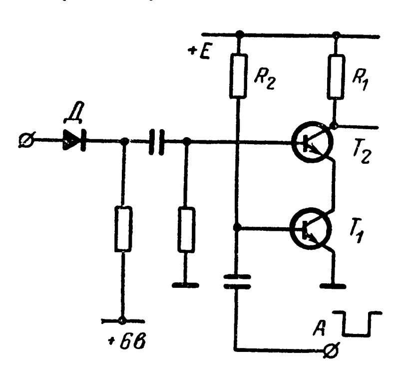
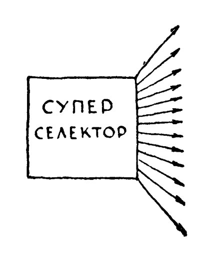


Рис. 89. Поданный на вход диода импульс с напряжением выше 6 *в* отпирает транзистор T_2, если только поступающий в точку *A* импульс не запрет транзистор T_1.

дится в состоянии насыщения. В самом деле, его база через резистор R_2 соединена с $+E$, и он накоротко замыкает цепь эмиттера T_2 на корпус. Все происходит, как если бы эмиттер транзистора T_2 был заземлен. В это время транзистор T_2 заперт, напряжение смещения на его базе равно нулю. Этот транзистор отпирается напряжением, поступающим с катода диода с порогом $+6$ *в*. Если в точке *A* нет никакого сигнала, то приходящий на базу T_2 сигнал создаст отрицательный сигнал на его коллекторе. И наоборот, если в точку *A* с однотактного триггера под воздействием сигнала с катода диода с порогом $+8$ *в* придет отрицательный импульс, транзистор T_1 запрется на все время его длительности и изменений на выходе (на коллекторе T_2) никаких не будет даже при отпертом транзисторе T_2.



Н. — Но признайся, Любознайкин, что твоя схема эффективна только для сигналов, которые могут придти на базу T_2 во время выдаваемого однотактным триггером сигнала. Если же приходящие на базу транзистора T_2 сигналы окажутся более продолжительными, то вся система не сработает.

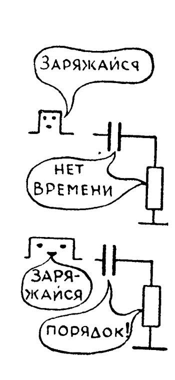
Л. — Ты прав, в принципе эта система рассчитана только на относительно короткие импульсы. При желании сделать ее пригодной для любых сигналов следовало бы заменить одновибратор своего рода триггером Шмитта и непосредственно связать выход этого триггера с базой транзистора T_1.

Н. — Тогда твой амплитудный селектор превратится в относительно сложное устройство; к счастью, у него всего лишь пять каналов.

Л. — Не успокаивайся так легко, Незнайкин. Существуют амплитудные селекторы с числом каналов до 100 и даже до 200.

Просто нужно достаточное количество раз повторить описанную схему. Такие селекторы, в частности, применяются для селекции импульсов, поступающих со счетчика Гейгера-Мюллера или со сцинтилляционного счетчика. Они позволяют раздельно подсчитывать импульсы с амплитудой меньше 1 *в*, от 1 до 2 *в*, от 2 до 3 *в* и т. д. Такой раздельный подсчет импульсов определенного уровня позволяет получить представление об энергетическом спектре обнаруженных названными датчиками частиц.

Селекция сигналов по их длительности



Н. — А как следует поступить, если потребуется разделить сигналы не по амплитуде, а по длительности?

Л. — Возможно несколько решений. Для начала нам, естественно, следует сделать все эти импульсы одинаковыми по амплитуде, т. е. подрезать их сверху до одного уровня. После такой предварительной обработки можно воспользоваться простой дифференцирующей схемой, например, изображенной на рис. 64.

Н. — Тогда я больше ничего не понимаю. Ведь такая схема превратит каждый прямоугольный сигнал в два импульса, первый положительный и второй отрицательный.

Л. — Это может произойти только с очень широкими импульсами. Вспомни, что мы говорили о возможности создания

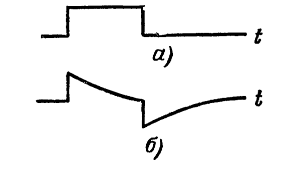


Рис. 90. Прямоугольный импульс (*а*), поданный на схему с *RC* меньше его длительности, очень сильно деформируется, у него появляется значительный отрицательный выброс (*б*).

схемы с произведением *RC* достаточно большой величины по сравнению с продолжительностью импульса. Если на такую схему подать длинный импульс (рис. 90, *а*), выходное напряжение получится действительно такое, как показано на рис. 90, *б*: в начале положительный импульс, а за ним отрицательный. Как ты видишь, продолжительность входного сигнала настолько велика, что конденсатор за время сигнала успевает полностью зарядиться. Если же я пошлю более короткий импульс (рис. 91, *а*),

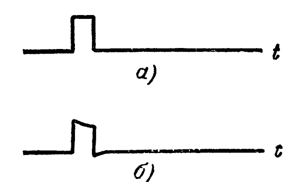


Рис. 91. Прямоугольный импульс (*а*), поданный на схему с *RC* много больше его длительности, деформируется мало, его отрицательный выброс невелик (*б*).



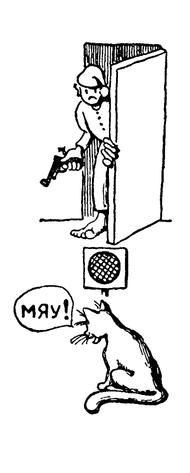
то при прохождении сигнала конденсатору не хватит времени зарядиться (вернее, он зарядится очень немного). И на выходе схемы мы получим сигнал, близкий к изображенному на рис. 91, *б*, который практически не содержит отрицательный импульс. С помощью системы, срезающей положительные импульсы и обнаруживающей отрицательные, превышающие заданный порог, можно создать схему, способную разделить импульсы на корот-

кие (которые не дадут выходного сигнала) и длинные (которые дадут на выходе сигнал по окончании длинного импульса).

Н. — Не могу сказать, что это удачно. Почему не создать систему, которая давала бы сигнал в самом начале длинного импульса?

Л. — Скажи, пожалуйста, Незнайкин, неужели ты думаешь, что система способна превратиться в гадалку; ведь короткий и длинный импульсы начинаются совершенно одинаково. Лишь добравшись до конца, можно определить, имеем мы дело с коротким или с длинным импульсом.

Н. — Согласен... Признаюсь, что об этом я не подумал.



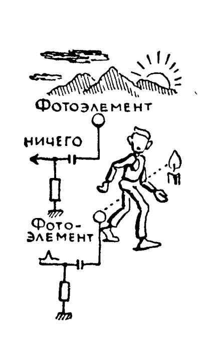
Дискриминатор формы

Л. — Это доказывает, что всегда прежде, чем говорить, полезно немного подумать. Теперь нам может понадобиться различать сигналы по их форме. Мы, например, можем сделать систему, выявляющую только короткие импульсы и не реагирующую на медленные изменения сигнала. Для этого достаточно использовать нашу дифференцирующую схему на рис. 64. Если на вход этой схемы подать медленно изменяющееся напряжение, то на выходе практически ничего не получим, так как пока напряжение медленно изменяется, конденсатор успеет зарядиться или разрядиться при минимальном зарядном или разрядном токе, который создаст лишь очень небольшое напряжение на резисторе, в то время как резкое изменение напряжения на входе будет полностью передано конденсатором и, следовательно, мы его получим на выходе.

Н. — Твое объяснение я понял, но совершенно не вижу, какую пользу может принести умение отделять быстро изменяющиеся сигналы от медленно изменяющихся.

Л. — У тебя просто короткая память. Вспомни ту знаменитую систему охраны от воров, с которой у тебя были некоторые неприятности...

Н. — О, не говори мне больше об этом ужасе, о нем я буду помнить всю жизнь!



Л. — Ты, вероятно, тем не менее помнишь, что я рекомендовал тебе использовать фотоэлектрический элемент. В этом случае было бы целесообразно поставить после фотоэлемента схему, чувствительную только к таким резким изменениям освещенности, какое может вызвать человек, проходящий между лампой и фотоэлементом. Таким образом удастся устранить воздействие медленных изменений освещенности фотоэлемента, например, при восходе солнца или при наступлении темноты.

Н. — А что нужно сделать, если бы потребовалось прямо обратное, т. е. система чувствительная только к медленным изменениям освещенности и не реагирующая на резкие изменения?

Л. — В таком случае можно просто-напросто воспользоваться интегрирующей схемой на рис. 70. Если схема (рис. 61) представляет собой фильтр верхних частот, то схема (рис. 70) работает как фильтр нижних частот. Она устраняет высокочастотные составляющие или быстрые изменения и сохраняет постоянную и низкочастотные составляющие.

Одну аналогичную систему я установил на своем автомобиле. В передней части капота я поместил маленький фотоэлемент, который, приводя в действие триггер Шмитта, зажигает лампу на приборной доске, когда становится довольно темно, но пока я еще не включил фары. А так как я не хотел, чтобы эта лампа мор-

гала каждый раз, когда я проезжаю под тенистыми деревьями, я поставил фильтр, схема которого изображена на рис. 70, и снабдил его постоянной времени на добрый десяток секунд. Все происходит так, как если бы мой фотоэлемент срабатывал очень медленно и реагировал только на среднюю яркость неба, на которое он направлен.

Постоянная времени

Н. — Очень остроумная идея. Однако я хотел бы точно знать, что ты подразумеваешь под постоянной времени.

Л. — Речь идет о совершенно классической величине, которую используют во всех схемах, построенных на резисторе и конденсаторе. Видишь ли, Незнайкин, при умножении емкости конденсатора *C*, стоящего, например, в интегрирующей схеме, на сопротивление резистора *R* получают величину, которая имеет размерность времени и может быть выражена в секундах (при условии, что *C* выражено в фарадах, а *R* — в омах). Это время, необходимое для заряда или разряда конденсатора через резистор на 63% относительно установившегося значения. Не проси меня обосновать это число, ибо это вынудило бы нас заняться дифференциальными уравнениями.

Н. — Все, что хочешь, но только не это!

Л. — Успокойся, в этом нет необходимости. По прошествии времени, равного постоянной времени *RC*, конденсатор зарядится или разрядится на 63% относительно установившегося значения. По истечении удвоенной постоянной времени он зарядится или разрядится на 86%. И, наконец, по прошествии утроенной постоянной времени его заряд (или разряд) достигнет 95%. Иначе говоря, на характеристиках каждой конкретной дифференцирующей или интегрирующей схемы сказываются не индивидуальные значения *R* или *C*, а их произведение, выражаемое в секундах (или микросекундах) и именуемое постоянной времени.

Н. — Так значит, если я правильно понял, когда потребовалось разделить сигналы по их длительности, ты выбрал малую постоянную времени по сравнению с длительностью сигнала на рис. 90, *а* и большую по сравнению с длительностью сигнала на рис. 91, *а*?

Л. — Ты совершенно прав, именно так выбирают постоянную времени. Впрочем, именно по этой причине дискриминатор по длительности сигналов работает тем эффективнее, чем выше отношение между длительностью длинного и короткого сигналов. ■

Беседа десятая

Наши друзья проследили за полными приключений путешествиями сигнала и подошли к моменту, когда у них возникло желание использовать сигнал. Незнайкин узнает, что «Реле — это не так просто!». Выясняется, что для осуществления вращения необходим двигатель. Любознайкин открывает ему секреты этих устройств и схем, которые могут ими управлять.

Реле и двигатели

Любознайкин. — А теперь мы рассмотрим различные типы «восстановителей».

Незнайкин — Что это за прибор? До сих пор ты о них мне ничего не говорил.

Л. — Неправда, мы уже говорили о них; ты, вероятно, просто забыл, что всякая электронная аппаратура состоит из: 1) датчика, превращающего исследуемое физическое явление в электрический сигнал; 2) преобразователя сигнала; 3) восстановителя, использующего преобразованный сигнал для измерения или выполнения требуемого действия.

Н. — О, наконец-то мы добрались до последнего звена. Это начинает становиться серьезным.

Л. — Но это, Незнайкин, всегда было серьезным. И если мы сейчас приступаем к последнему звену, нам еще придется немало поговорить о различных частных применениях электронных устройств. Но как бы то ни было, начнем мы с реле.

Сопротивление катушки реле

Н. — Это совершенно излишне, я основательно знаком с этим вопросом.

Л. — Ну, если по твоему преисполненному скромности выражению «ты основательно знаком с вопросом», я позволю себе спросить, а можешь ли ты сказать, как зависит сопротивление катушки конкретного реле от напряжения, при котором оно должно работать?

Н. — Хм,.. но это скорее вопрос для математика!

Л. — О, я не требую от тебя длинных и сложных математических выражений, я лишь прошу тебя немного подумать.

Важной характеристикой каждого реле является необходимое для срабатывания число ампер-витков, иначе говоря, произведение количества витков катушки на ток, необходимый для того, чтобы сердечник притянул якорь и тем самым замкнул контакты реле.



Рассмотрим изображенное на рис. 92 реле. Размер реле в значительной степени определяется размерами катушки. Катушка состоит из некоторого количества витков провода определенного сечения и с определенным сопротивлением. Предположим, что мы заменим этот провод другим с втрое меньшим диаметром. Как изменится его сечение?

Н. — Очень просто, в 3 раза.

Л. — За такой ответ, Незнайкин, я ставлю тебе нуль. Как можешь ты утверждать, что при уменьшении диаметра круга в 3 раза его площадь уменьшается во столько же раз? Ведь ты уже давно должен знать, что площадь круга пропорциональна квадрату его радиуса! Следовательно, уменьшив в 3 раза радиус (или диаметр) провода, мы в 9 раз уменьшим его сечение, что позволит нам при тех же размерах катушки намотать провода в 9 раз больше. Можешь ли ты сказать, какое сопротивление будет иметь наша новая катушка?

Н. — На этот раз все очень просто. Длина провода увеличилась в 9 раз, значит и его сопротивление стало в 9 раз больше.

Л. — На этот раз ты, Незнайкин, переходишь всякие границы! Разве ты забыл, что длина провода увеличилась в 9 раз, а его сечение уменьшилось тоже в 9 раз; следовательно, сопротивление провода возросло в 81 раз.

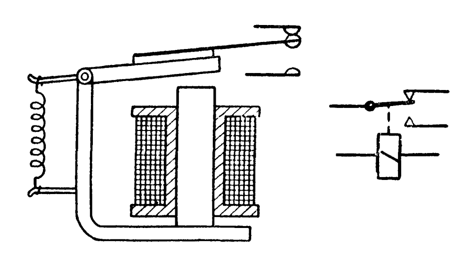


Рис. 92. Реле (его условное обозначение приведено справа) имеет катушку, создающую магнитное поле, под действием которого притягивается якорь, что приводит к замыканию или размыканию так называемых рабочих контактов.

Н. — Вот так раз! Я никогда не подумал бы, что при уменьшении диаметра провода только в 3 раза так резко растет его сопротивление. Но ведь прохождение тока по такому проводу вызовет колоссальное рассеяние мощности.



Л. — Совсем нет. Раз новая катушка имеет витков в 9 раз больше, чем первая, то пропускаемый ток можно уменьшить в 9 раз. А принимая во внимание, что рассеиваемая мощность пропорциональна сопротивлению и квадрату тока, рассеиваемая в новой катушке мощность будет точно такой же, как в первой катушке. Полученный нами результат дает лишь самое общее представление; после определения объема меди в катушке только рассеиваемая в этой катушке мощность характеризует магнитное воздействие на якорь реле. Поэтому, характеризуя реле, говорят, что его мощность возбуждения 1 *вт* или 1/2 *вт*. Реле с катушкой из толстого провода рассчитано на управление большим током при низком напряжении, а реле с катушкой из тонкого провода включается в цепи с небольшим током при более высоком напряжении.

Обычные реле часто требуют для управления мощность порядка 1 *вт*. У более чувствительных реле для притягивания якоря достаточно 0,2 или даже 0,1 *вт*. Ультрачувствительные реле могут срабатывать при мощностях возбуждения порядка милливатта; обычно они способны включать и выключать только очень небольшие токи и поэтому непосредственно в исполнительных цепях совершенно не используются. Их применяют для приведения в действие промежуточных более мощных реле.

Транзистор управляет реле

Н. — Мне в голову пришла великолепная идея: а что если ток пустить не прямо в обмотку реле, а подать его на базу транзистора, коллекторный ток которого протекает по катушке реле, ведь тогда для включения реле потребовалась бы значительно меньшая мощность. В случае надобности нужную мощность управляющего сигнала можно сократить, введя в схему еще один усилительный каскад на транзисторе.

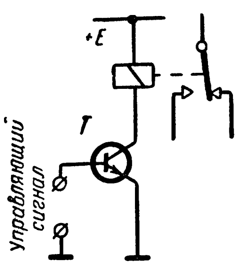
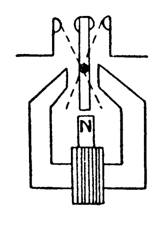
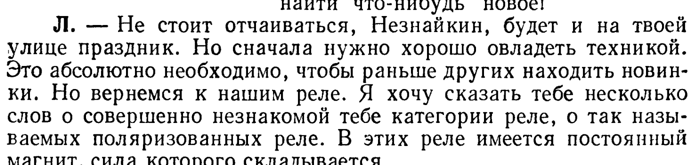


Рис. 93. Для эффективного управления работой реле можно использовать транзистор.

Л. — Ты совершенно прав, Незнайкин, и мне остается лишь добавить, что эта идея уже предложена и даже реализована. Заводы уже выпускают реле, у которых рядом с катушкой размещается транзисторный усилитель (рис. 93); такие реле для своего управления требуют ничтожных мощностей. Существуют даже реле, в которых перед усилителем стоит триггер Шмитта, который с высокой точностью определяет уровни срабатывания и отпускания реле.

Н. — Опять кто-то меня опередил... Я уже начинаю сомневаться, что мне когда-нибудь удастся раньше других найти что-нибудь новое!





Л. — Не стоит отчаиваться, Незнайкин, будет и на твоей улице праздник. Но сначала нужно хорошо овладеть техникой. Это абсолютно необходимо, чтобы раньше других находить новинки. Но вернемся к нашим реле. Я хочу сказать тебе несколько слов о совершенно незнакомой тебе категории реле, о так называемых поляризованных реле. В этих реле имеется постоянный магнит, сила которого складывается с силой притяжения катушки, иначе говоря, в зависимости от направления тока катушка притягивает или отталкивает якорь. Поляризованные реле срабатывают только при одном определенном направлении тока в катушке.

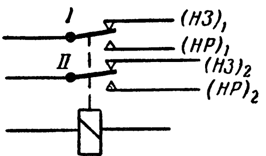


Рис. 94. Одна катушка может приводить в действие две перекидные контактные группы, размыкая два нормально замкнутых контакта и замыкая два нормально разомкнутых контакта.

Н. — Такого результата можно было бы достичь значительно проще: достаточно последовательно с катушкой включить простой диод.

Л. — Да, если задача заключается только в том, чтобы реле срабатывало при заданном направлении тока, но поляризованное реле способно на большее. Можно сделать так, что подвижный якорь при направлении тока, принятом в качестве положительного, переместится вправо и замкнет определенный контакт. В отсутствие тока якорь может оставаться в среднем положении, а при подаче тока обратного направления якорь переместится влево и замкнет другой контакт. Такое реле обладает большими возможностями, чем обычное реле с диодом, включенным последовательно с катушкой. Впрочем, Незнайкин, ты знаешь, что в обычных реле имеется так называемый нормально замкнутый(НЗ) контакт, который замкнут, когда реле не возбуждено; при срабатывании этот контакт размыкается. Обычно для размыкания

нормально замкнутого контакта и для замыкания нормально разомкнутых (НР) контактов при притягивании якоря используются одни и те же подвижные контакты. В этом случае мы имеем дело с перекидной контактной группой. В одном реле может быть несколько таких контактных групп[1] (рис. 94).

Меры предосторожности при использовании транзистора для управления реле

Н. — Я полагаю, что теперь я все знаю о реле.

Л. — Я всегда знал, что скромность никогда не была твоим основным качеством, Незнайкин. О реле написаны целые тома, я же ограничусь еще некоторыми деталями. Прежде всего, знаешь ли ты, какие особые меры предосторожности необходимо принять, когда для управления током в катушке реле используют транзистор или электронную лампу?



Н. — Я полагаю, что следует выбрать транзистор или лампу, способные без особого труда дать необходимый ток.

Л. — Естественно, это первое условие, но одного его недостаточно. Можешь ли ты себе представить, что произойдет, если после установления тока в катушке реле транзистор резко запирается соответствующим напряжением, поданным на его базу?

Н. — В этих условиях ток в катушке обрывается и якорь отходит от сердечника катушки.

Л. — Твое невежество, Незнайкин, может иметь самые гибельные последствия. Ты кажется забыл, что катушка реле обладает высокой величиной самоиндукции и что поэтому она довольно резко противодействует быстрым изменениям тока. Есть еще один принцип, который я посоветовал бы тебе вырезать на своем камине, если там еще осталось свободное место. Принцип этот сводится к следующему:

«Проходящий по катушке ток не может измениться на конечную величину за бесконечно малое время».



Следовательно, если, желая резко прервать ток в катушке, мы запрем транзистор, то на выводах катушки возникает напряжение, которое может достичь значительной величины. Это напряжение может оказаться настолько большим, что разрушит транзистор или катушку реле или, если нам особенно не повезет, то и другое одновременно.

Н. — И это ты называешь невезением? Я бы просто сказал, что это нормальное проявление хорошо известной теоремы «о бутерброде с маслом».

Л. — О чем там идет речь?

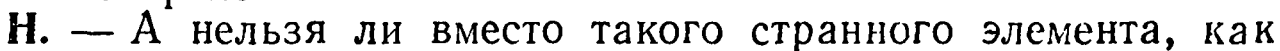
Н. — Теорема гласит, что когда ты роняешь бутерброд с маслом, он всегда падает намазанной стороной вниз и полностью опровергает любые расчеты, основанные на теории вероятностей.

Л. — На мой взгляд, дорогой Незнайкин, в твои объяснения вкралась небольшая неточность. Дело в том, что наличие масла несколько сместило центр тяжести бутерброда, и мне представляется, что для твоей знаменитой теоремы можно найти физическое, а не мистическое объяснение. Но оставим эти высокие рассуждения и вернемся к нашим реле. Мы должны констатировать, что значительные перенапряжения возможны и поэтому следует заняться поиском средства для защиты от них реле и управляю-

---

[1] Положение контактов в схемах реле всегда соответствует обесточенной катушке, точнее непритянутому якорю (*Прим. ред.*).

щего им транзистора. Существует довольно простой метод, заключающийся в использовании полупроводников, сопротивление которых изменяется в зависимости от приложенного к ним напряжения, иначе говоря, речь идет об элементах, не подчиняющихся закону Ома. Такие приборы называют варисторами или элементами VDR (от английского выражения Voltage Dependent Resistance — резисторы, сопротивление которых зависит от напряжения). Так, например, существует варистор, который при напряжении 12 *в* пропускает ток 5 *ма*, а при напряжении 24 *в* пропускает ток, в 15 раз больший 75 *ма*. Такой варистор можно включить параллельно катушке реле, рассчитанной на 12 *в*. При резком выключении проходящего по катушке тока, если этот ток не превышает 75 *ма*, он сначала пройдет по варистору и поднимет там напряжение всего лишь до 24 *в*, а оно быстро спадет. При обычных рабочих условиях напряжение на выводах варистора равно 12 *в*, и поэтому этот элемент потребляет только 5 *ма*, что практически ничтожно по сравнению с большим током, потребляемым реле.





Н. — А нельзя ли вместо такого странного элемента, как варистор, поставить простой резистор?

Л. — Да, в принципе это возможно, но представь себе, что мы пожелали ограничить перенапряжение величиной 24 *в*, тогда понадобилось бы поставить резистор, который при напряжении 24 *в* мог пропустить ток 75 *ма*, — такой резистор должен иметь сопротивление 320 *ом*. Этот резистор, включенный параллельно катушке в нормальных рабочих условиях, потреблял бы около 37 *ма*, что далеко не ничтожно по сравнению с проходящим по реле током. Для нашей схемы потребовался бы транзистор, способный пропускать ток 37 *ма* + 75 *ма* = 112 *ма*, из которых только 75 *ма* с пользой используются реле.

Н. — О, теперь я прекрасно вижу, какой интерес представляют варисторы. Но, если подумать, они по сути дела выполняют примерно такую же роль, что и спусковые диоды мультивибратора, о котором мы уже говорили. В самом деле, при нормальном режиме работы они почти отключены от реле, а при повышении напряжения включаются.

Защитное устройство из диодов

Л. — Действительно, здесь есть определенная аналогия. Впрочем, для защиты реле можно также использовать диод; достаточно включить его, как я показал на рис. 95. Как ты видишь,

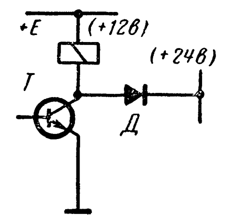
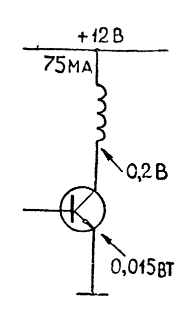


Рис. 95. При резком запирании транзистора возникающая э. д. с. повышает потенциал коллектора до такой величины, что диод *Д* начинает проводить ток. Таким образом диод защищает транзистор.

при любом резком отключении коллекторного тока потенциал коллектора этого транзистора не может подняться выше 24 *в*.

Н. — Я предпочитаю схему с варистором, потому что она не требует вспомогательного источника напряжения 24 *в*. Но один момент меня серьезно беспокоит в твоем числовом примере.

Ты говорил о реле, потребляющем ток 75 *ма* при напряжении 12 *в*, т. е. с мощностью в катушке 0,9 *вт*.



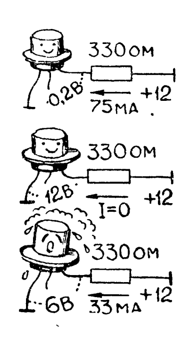
Л. — Но ведь это совершенно нормальная величина, Незнайкин, и, если ты помнишь, я тебе об этом недавно говорил.

Н. — Да, реле у меня не вызывает никакого сомнения, но я полагаю, что транзистор должен быть довольно мощным, потому что ему приходится рассеивать 1 *вт*.

Л. — Совсем нет, дорогой Незнайкин. Подумай сам, ведь при нормальных рабочих условиях транзистор находится в состоянии насыщения; коллекторный ток составляет 75 *ма*, но напряжение на его коллекторе почти равно нулю, так как 12 *в* почти полностью находятся на клеммах катушки реле. В этих условиях на коллекторе транзистора рассеивается чрезвычайно небольшая мощность.

Н. — Значит, я могу обойтись совсем маленьким транзистором при условии, если он выдерживает коллекторный ток 75 *ма* и 24 *в* в запертом состоянии?

Л. — Несомненно, если ты уверен, что транзистор используется либо в запертом состоянии, либо в состоянии насыщения. Но если транзистор также используется в состоянии между насыщением и запиранием, то на коллекторе будет рассеиваться определенная мощность. Несложно рассчитать, что здесь, как и для любого транзистора с напряжением питания $+E$, поступающим через резистор R, максимальная рассеиваемая на коллекторе мощность составляет $E^2/4R$ или равна четверти максимальной мощности, рассеиваемой на резисторе, когда транзистор находится в состоянии насыщения. Эта максимальная рассеиваемая на коллекторе транзистора мощность соответствует режиму, когда напряжение на выводах транзистора равно напряжению на выводах нагрузки (оба эти напряжения равны $E/2$). В интересующем нас случае наибольшая мощность на коллекторе транзистора будет рассеиваться, когда напряжение на выводах нагрузки составит 6 *в* (и, следовательно, на выводах транзистора будет тоже 6 *в*). Как я уже сказал, она соответствует четверти максимальной мощности рассеяния в катушке реле или несколько превышает 0,22 *вт*. Такую мощность свободно выдерживают многие даже очень маломощные транзисторы.



Выбор транзистора

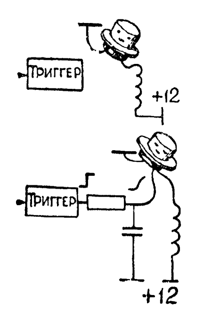
Н. — Итак, подведем итоги. Если я правильно тебя понял, имеются две возможности: 1) транзистор работает только в запертом состоянии и в состоянии насыщения, и тогда на коллекторе рассеивается незначительная мощность; 2) транзистор постепенно переходит от запертого состояния к состоянию насыщения, и тогда он должен обладать способностью рассеивать 0,22 *вт*. Но в таком состоянии, когда он рассеивает 0,22 *вт*, транзистор находится очень короткое время (напряжение на выводах катушки составляет всего лишь половину номинального, и вполне вероятно, что в этих условиях реле не сработает). Поэтому можно взять транзистор, рассчитанный на 150 *мвт* или даже на еще меньшую мощность.



Л. — Нет, Незнайкин, при работе с транзисторами нельзя рассуждать так же, как при работе с лампами. Даже на очень короткое время нельзя допускать превышения теоретических пределов рассеяния. Транзисторный переход обладает очень небольшой термической инерцией, иначе говоря, его температура поднимается очень быстро вслед за изменением рассеиваемой мощности. Лампы отличаются большим запасом прочности, например

лампа, предназначенная для рассеяния на ее аноде не более одного ватта, может в течение нескольких секунд выдержать 4 или даже 5 *вт* при условии, что она не очень часто будет подвергаться такому испытанию. Установленные для транзистора пределы необходимо выдерживать значительно строже. Кроме того, анод лампы разогревается довольно долго, тогда как нагревание перехода в транзисторе продолжается всего лишь несколько миллисекунд. И, наконец, следует сказать, что нет абсолютно никаких доказательств, что в один прекрасный день система не окажется в таком состоянии, когда транзистор рассеивает 0,22 *вт* (т. е. в самом неблагоприятном режиме).

Н. — Так, значит, использовать транзистор меньшей мощности невозможно?



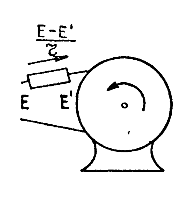
Л. — Вполне возможно, но для этого необходимо управлять транзистором, например, с помощью триггера Шмитта, чтобы транзистор всегда был заперт или насыщен и никогда не мог оказаться в промежуточном состоянии. Но тогда вновь придется столкнуться с неприятностями, уже упоминавшимися в связи со слишком быстрыми изменениями коллекторного тока. Возникает опасность появления значительных перенапряжений, от которых в качестве защиты придется использовать диод или варистор.

Н. — А нельзя ли в этом случае между триггером Шмитта и базой транзистора включить небольшой фильтр низких частот такого типа, который ты называешь интегрирующей схемой. Тогда переход от насыщения к запиранию все равно происходил бы достаточно быстро и транзистор очень небольшое время пребывал в неблагоприятном состоянии, рассеивая 0,22 *вт*, но в то же время переход был бы не настолько быстрым, чтобы вызвать значительное перенапряжение.

Л. — Превосходно рассудил, Незнайкин, но может случиться, что приемлемый компромисс будет трудно найти. Во всяком случае, при передаче импульса с крутым фронтом на базу транзистора, в цепь коллектора которого включена катушка, настоятельно рекомендуется снизить крутизну фронта с помощью интегрирующей схемы. А теперь, если у тебя есть желание, мы рассмотрим другую категорию восстановителей, какими являются двигатели.

Н. — Эти устройства отличаются большой сложностью, и я имею о них довольно смутное представление.

Двигатель постоянного тока



Л. — Я несколько сомневаюсь в справедливости твоих слов, и поэтому мы немного займемся электротехникой. Начнем с двигателя постоянного тока. Посмотри, что я нарисовал на рис. 96. Большой подковообразный магнит создает горизонтальное магнитное поле; в это поле я поместил горизонтально расположенный виток провода и пропустил по нему ток. Забудем на минуту о магните; скажи, пожалуйста, что произойдет с нашим витком под воздействием протекающего по нему тока?

Н. — О, это я знаю. Виток превратится в нечто аналогичное совершенно плоскому магниту; северный полюс этого магнита расположится сверху, а южный — снизу.

Л. — Абсолютно верно. Но скажи, Незнайкин, как, по твоему мнению, постоянный и неподвижный магнит с горизонтальным магнитным полем будет воздействовать на виток, обладающий вертикальным магнитным полем?

Н. — Я полагаю, что оба магнита будут воздействовать друг на друга и в результате такого взаимодействия магнит или виток повернутся.

Л. — Так как магнит прочно укреплен, повернется виток, он будет стремиться подвести свой северный полюс к южному полюсу магнита. Если виток укрепить на оси, то повернется и эта ось.

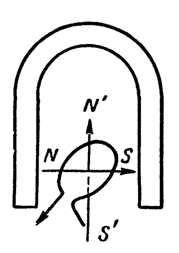


Рис. 96. Схематическое изображение принципа действия электродвигателя. Виток помещен в магнитное поле NS, создаваемое постоянным магнитом; протекающий по витку ток создает магнитное поле $N'S'$, которое, взаимодействуя с полем магнита, поворачивает виток.

Н. — Мне не хотелось бы тебя огорчать, Любознайкин, но, если я правильно понимаю, «двигатель Любознайкина» может повернуться только на четверть оборота, иначе говоря, он очень мало меня интересует.

Л. — Не торопись с подобной критикой. Если бы у меня был только один подобный виток, то он (я в этом с тобой полностью согласен) смог бы повернуться только на четверть оборота. Но я хитрей, чем ты думаешь. Я укреплю на оси несколько витков, несколько сместив один относительно другого, чтобы они могли работать поочередно.

Н. — Но тогда нужно приставить специального человека, который посылал бы ток в различные витки. Он должен поворачиваться очень быстро и посылать ток именно в нужный виток.

Коллектор и щетки

Л. —Начнем с того, что предложенному тобой человеку вообще нечего делать, потому что по мере вращения оси витки сами будут проходить поочередно перед ним. Посмотри на рис. 97, где я нарисовал два витка и обозначил их цифрами *1* и *2*. Как

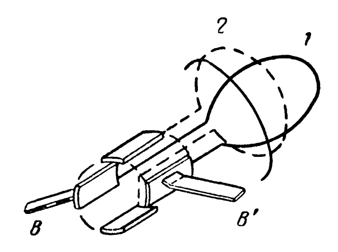


Рис. 97. Чтобы изображенный на предыдущем рисунке двигатель мог повернуться более чем на $^1/_4$ оборота, пришедший в движение виток *1* затем заменяют витком *2*.

ты видишь, витки заканчиваются небольшими пластинками, при соединении которых со щетками B и B' по виткам протекает ток. Когда виток *1* расположен горизонтально (или немного наклонно) щетки B и B' подают ток в него. Когда (под воздействием магнита на создаваемое этим витком магнитное поле) ось начнет вращаться, ток перестанет поступать в виток *1*, но в это время его

место займет виток 2, в котором и начнет протекать ток через щитки B и B'.

Н. — Очень хитрая система. Значит ты расположишь перпендикулярно два витка, которые будут работать поочередно.

Л. — Я поставлю не два, а значительно большее количество витков, следовательно, больше придется поставить и пластинок. Реальная конструкция витков намного сложнее, но и описанная мной система вполне пригодна для практического использования. Таким образом, мы создали двигатель постоянного тока. Барабан из пластинок, вращающийся между щетками и поочередно подключающий к ним различные витки, называется коллектором. Иногда для создания магнитного поля, воздействующего на витки, используют постоянный магнит, как это показано на рис. 96, но часто предпочтение отдают электромагниту. Его катушку называют обмоткой возбуждения, а вращающуюся катушку — обмоткой якоря.

Н. — По сути дела электрический двигатель не так сложен, как я думал.

Л. — Правильно, в принципе это очень просто. Видишь ли, Незнайкин, вся хитрость конструкции двигателя заключается в использовании силы воздействия поперечных силовых линий магнитного поля на электрический ток. На заре электротехники думали использовать силу электромагнита, притягивающего железо. Эта сила в большей степени зависит от расстояния между электромагнитом и куском железа и поэтому требует создания сложной системы переключения катушек. Это обстоятельство побудило ряд очень серьезных авторов заявить, что электрический двигатель осужден окончательно и бесповоротно и что его никогда и нигде, кроме как в игрушках, использовать не удастся. К счастью, после этого подумали об использовании боковых сил. Попутно скажу тебе, что якорь обычно делают не из одного куска металла, а набирают из пластин, как трансформаторы, чтобы избежать возникновения вихревых токов. В якоре прорезают канавки, куда укладывают витки провода, о которых я тебе уже говорил. Стальные детали в форме полумесяца, именуемые полюсными наконечниками (потому что они соединены с полюсами магнита или электромагнита), расположены почти вплотную к якорю, чтобы облегчить замыкание в нем магнитных силовых линий. А теперь, Незнайкин, я задам тебе каверзный вопрос. Что случится, если я возьму двигатель постоянного тока с постоянным магнитом и начну вращать его якорь?

Динамомашина

Н. — О, своим вопросом ты ставишь меня в довольно затруднительное положение. Я полагаю, что раз витки провода пересекают магнитное поле, в этих витках должно наводиться напряжение.

Л. — Совершенно верно, благодаря щеткам и коллектору проводник, в котором магнитный поток изменяется наиболее быстро, всегда окажется соединенным через щетки с внешней цепью, и наш двигатель превратится в источник электрического тока.

Н. — Согласен, я внимательно следил за твоими объяснениями, но хотел бы знать, какова будет частота этого тока?

Л. — Тебе, Незнайкин, придется немало потрудиться, чтобы ее найти, потому что она равна нулю... На практике наша машина не даст строго постоянного тока: когда щетки будут поки-

нуты парой пластин коллектора, сменяемой другой парой, в цепи возникнут небольшие колебания. Но так как очередной подключаемый к щеткам виток вращающегося якоря всегда занимает одно и то же положение относительно магнита, то ток во внешней цепи, подключенной к щеткам, будет всегда протекать в одном направлении. Таким образом, мы создали прибор, который называется динамомашиной.

Н. — Одно обстоятельство меня серьезно беспокоит: я не вижу никакой разницы между двигателем и динамомашиной!

Л. — Ты прав, Незнайкин, потому что конструктивно это абсолютно одно и то же. Все сводится только к вопросу об использовании. Если я вращаю якорь, затрачивая механическую энергию, и собираю произведенную электроэнергию, то я использую наш прибор как динамомашину; если я подаю ток в якорь, затрачивая электрическую энергию, и применяю полученную механическую энергию, то я использую его как электродвигатель.

Противоэлектродвижущая сила

Н. — Согласен, но и здесь один вопрос меня беспокоит. Когда мы заставим наш прибор работать как электродвигатель, а он на это время не забудет, что может быть динамомашиной... Тогда он в свою очередь начнет производить электрический ток, который наложится на тот, что мы ему подаем... Что же будет делать этот ток, помогать или мешать?

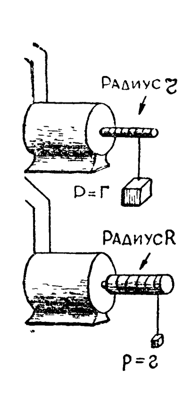
Л. — Превосходно рассудил, Незнайкин, но ты мог бы сам найти ответ на свой вопрос, вспомнив о противоречивом характере индукции, ты можешь быть заранее уверен, что создаваемая нашим прибором э. д. с. (так как он всегда остается динамомашиной) будет противостоять тому току, который мы создаем внешним источником, чтобы заставить работать прибор как двигатель. Эту препятствующую э. д. с. называют противоэлектродвижущей силой двигателя.

Н. — Но это же ужасно! В двигателе не будет никакого тока, и он перестанет вращаться... Но если он перестанет вращаться, исчезнет противо-э. д. с. и он опять начнет вращаться... Я чувствую, что схожу с ума!

Л. — Не нервничай, Незнайкин, все это намного проще. Представь себе, что я подаю на двигатель некоторое напряжение, в результате по виткам якоря потечет ток, скорость вращения будет нарастать. По мере увеличения скорости вращения повышается и противо -э. д. с. Через некоторое время наступает момент, когда она станет достаточно близкой к приложенному напряжению, в результате чего разность между этими двумя напряжениями пропустит в двигатель относительно небольшой ток. Этого тока будет достаточно только для поддержания вращения: полученная механическая энергия целиком уйдет на преодоление силы трения. Теперь заставим двигатель выполнять работу и для этого подключим к нему какую-нибудь нагрузку. Движение двигателя несколько замедлится, что вызовет уменьшение противо -э. д. с., которая перестанет (в такой мере, как раньше) уравновешивать приложенное к двигателю напряжение, благодаря чему ток в двигателе возрастет и даст ему достаточную механическую энергию, чтобы справиться с увеличившейся нагрузкой.

Н. — Это кажется я понял. Но мне хотелось бы получить некоторые разъяснения относительно понятий силы торможения и скорости вращения.

Крутящий момент двигателя



Л. — Все это исключительно просто. Если ты силой остановишь якорь двигателя, то его желание вращаться (которое называют крутящим моментом; определение я дам тебе несколько позднее) будет пропорционально величине поступающего в якорь тока. Увеличь вдвое ток, и тем самым ты удвоишь желание двигателя вращаться. Для большей правильности выражений говорят о крутящем моменте двигателя. Этот момент характеризуется весом, который может поднять двигатель, когда этот вес привязан к шнуру, намотанному на укрепленный на оси барабан. Радиус барабана имеет в этом случае определенную величину.

Так, например, мы можем сказать, что крутящий момент двигателя при токе 1 *а* в его якоре 0,3 *кг · см*, если этот двигатель при токе в якоре не менее 1 *а* способен оторвать от пола груз весом в 0,3 *кг*, привязанный к шнуру, намотанному на барабан радиусом 1 *см*, который укреплен на оси двигателя.

Н. — О! Это страшно сложно. Но зачем понадобилось здесь указывать диаметр барабана?

Л. — Да потому, что, если я намотаю шнур на барабан очень малого диаметра, то даже двигатель малой мощности сможет поднять значительный груз, только поднимать он будет очень медленно, так как за каждый оборот будет выбирать совсем короткий кусочек шнура. И наоборот, значительно более почетно поднять такой же груз при большем диаметре барабана, потому что при такой же скорости вращения двигателя груз поднимется намного быстрее.

Н. — Судя по твоим объяснениям, величина протекающего по двигателю тока позволяет определить его желание вращаться (или, как ты говоришь, его крутящий момент, но я пока еще остерегаюсь употреблять этот термин, который остается для меня довольно таинственным).

Л. — Ты правильно понял, а теперь нам предстоит познакомиться еще с одним понятием — со скоростью двигателя для данного напряжения. Предположим, что двигатель полностью освобожден от трения, тогда противо -э. д. с. строго соответствует прилагаемому напряжению. Иначе говоря, когда ты прикладываешь к якорю двигателя напряжение 10 *в*, он приходит в движение и разгоняется до такой скорости, на которой двигатель в случае его использования в качестве динамомашины дал бы напряжение 10 *в*. В этот момент протекающий по якорю ток почти равен нулю. Впрочем, это вполне логично, раз от двигателя не требуют никакого крутящего момента, ему достаточно лишь поддерживать установившееся при этом вращение своего якоря. На самом же деле эти рассуждения справедливы только для двигателя на холостом ходу (т. е. не выполняющего никакой внешней работы) или для случая, когда обмотка якоря имеет очень низкое сопротивление.

Н. — Я начинаю понимать. Но ты неоднократно подчеркивал, что все рассказанное тобой относится к двигателю постоянного тока, и я надеюсь, что теперь ты перейдешь к более современным устройствам, а именно к двигателям переменного тока.

Работа на переменном токе

Л. — Я действительно собираюсь рассказать тебе о двигателях переменного тока, но, пожалуйста, не думай, что они более совершенные. Они имеют свои преимущества и свои недостатки, но если требуется большой крутящий момент в начале пуска и

способность хорошо приспосабливаться к изменяющимся условиям работы, лучшим несомненно окажется двигатель постоянного тока.

Но прежде чем рассказать тебе о двигателях, сконструированных специально для переменного тока, я задам тебе один вопрос: что произойдет, если включить в цепь переменного тока двигатель, якорь и коллектор которого рассчитаны на постоянный ток?

Н. — Я полагаю, что это ему совсем не понравится!

Л. — Я спрашиваю тебя не о его настроении, а о физических явлениях, которые могут произойти в двигателе.

Н. — Я думаю, что он начнет вибрировать, вращаясь чуть-чуть то в одну, то в другую сторону... до тех пор, пока вконец не испортится.

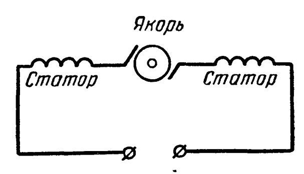


Рис. 98. В универсальном двигателе последовательного возбуждения обмотка статора включается последовательно с обмоткой якоря.

Л. — Ты прав, если мы возьмем двигатель, у которого статором служит постоянный магнит. У таких двигателей направление вращения действительно изменяется при изменении направления, протекающего по якорю тока. Совершенно другая картина получится, если мы возьмем двигатель, статор которого представляет собой электромагнит, а его катушка включена последовательно с обмоткой якоря, как это очень часто делают (рис. 98); при изменении направления тока произойдет перемагничивание электромагнита. В этих условиях при любом направлении тока, протекающего в обмотке якоря и соединенной с нею последовательно обмотке статора, двигатель всегда будет вращаться в одну сторону.

Н. — Ты очень неудачно шутишь. Так ты утверждаешь, что изменить направление движения такого двигателя невозможно?



Л. — Можно и несложно. Для этого нужно изменить направление тока в якоре и оставить без изменения направление тока в статоре. Достаточно переключить выводы электромагнита статора или якоря, и двигатель изменит направление вращения. Но если одновременно изменить направление тока и в якоре и в статоре, то направление вращения двигателя останется прежним. Поэтому, если такой двигатель питать переменным током, он всегда будет вращаться в одну сторону. Должен сказать, что это получило широкое распространение, и поэтому двигатель, в котором возбуждение статора осуществляется током, прошедшим через якорь, называется универсальным двигателем. Такой двигатель работает от постоянного тока, работает и от переменного, хотя и не так хорошо.

Н. — Почему не так хорошо? Он считает, что его обидели?

Двухфазный двигатель

Л. — Незнайкин, где твоя серьезность? Если он не так хорошо работает на переменном токе, то причина заключается просто в том, что переменный ток часто сам себя подавляет, а при небольшой величине он сообщает двигателю малый крутящий момент. Кроме того, наш двигатель обладает некоторой самоиндукцией, препятствующей прохождению переменного тока по обмоткам. А теперь мы рассмотрим принципиально иной двига-

тель, рассчитанный для работы только от переменного тока и успешно применяющийся в самых различных условиях, я имею в виду двухфазный двигатель. Посмотри на рис. 99. Я взял электромагнит, аналогичный обычному статору классического двигателя, и пустил в его обмотку переменный ток. Какое магнитное поле образуется между полюсными сердечниками?

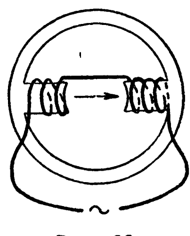


Рис 99.

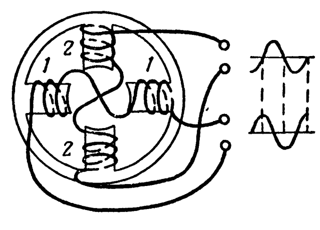
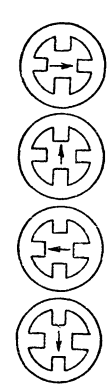


Рис. 100.

Рис. 99. Протекающий по обмоткам переменный ток создает переменное магнитное поле.

Рис. 100. С помощью двух пар катушек, по которым протекает сдвинутый по фазе переменный ток, можно создать вращающееся магнитное поле. Помещенный в это поле магнит вращается со скоростью вращения самого поля. На таком принципе устроен синхронный двигатель. Замкнув накоротко витки обмотки якоря, получают асинхронный двигатель.



Н. — Сначала скажи, правильно ли я понял, что полюсными сердечниками ты называешь выступы, на которые надета обмотка?

Л. — Совершенно верно, они снабжены полюсными башмаками, почти вплотную подходящими к якорю, но вернемся к моему вопросу.

Н. — Я полагаю, что магнитное поле пойдет от одного полюсного сердечника к другому. Сначала по мере повышения тока оно будет увеличиваться, потом снизится до нуля, после чего опять начнет увеличиваться в обратном направлении...

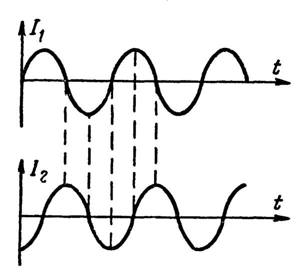


Рис. 101. Токи, возбуждающие две обмотки двухфазного двигателя, сдвинуты по фазе на 90° один относительно другого; максимальное значение одного соответствует нулевому значению другого.

Л. — Совершенно верно, а теперь мы введем вторую обмотку и усложним картину. Как ты видишь на рис. 100, это вторая обмотка стремится создать магнитное поле, направленное перпендикулярно первому. Я посылаю во вторую обмотку переменный ток такой же частоты, что и в первую, но запаздывающий относительно него на четверть периода (сдвиг по фазе на 90°).

Н. — Начало не предвещает ничего хорошего! Как только речь заходит о фазах, все сразу становится дьявольски сложно.

Л. — Не так уж страшно, если ты будешь внимательным. Ток I_2, который я посылаю в обмотку *2* (рис. 100), отстает на четверть периода от тока I_1, протекающего по обмотке *1*. Иначе говоря, ток в обмотке *2* равен нулю, когда ток в обмотке *1* достигает максимума. В момент, когда он в свою очередь достигает положительного максимума, ток в обмотке *1*, пройдя положительный полупериод, падает до нуля. В этих условиях магнитное поле ведет себя совершенно особым образом. Сначала, когда ток в обмотке *1* имеет максимальное положительное значение, магнитное поле направлено слева направо. Ток в обмотке *1* снижается, и одновременно увеличивается ток в обмотке *2*. В этих условиях появляется вертикальное поле, направленное снизу вверх, которое нарастает по мере уменьшения горизонтального поля, ориентированного слева направо.

В конце четверти периода существует только поле, направленное снизу вверх, и оно сразу же начинает убывать, потому что в этот момент начинает снижаться ток, протекающий по обмотке *2*. В этот же момент в обмотке *1* вновь появляется ток, но он течет в направлении, обратном первоначальному, что обычно обозначается знаком минус. Этот ток порождает небольшое магнитное поле, идущее налево. Некоторое время спустя, когда ток, протекая в обмотке *1* в противоположном направлении, достигает максимального значения (в обмотке *2* ток равен нулю), существует только поле, направленное налево, и оно достигает максимума. Протекающий по обмотке *1* отрицательный ток уменьшается (по абсолютному значению), а в это время в обмотке *2* появляется отрицательный ток, дающий нам вертикальное магнитное поле, которое на этот раз направлено сверху вниз. Когда ток в обмотке *1* вновь станет равным нулю, в нашем статоре останется только поле, направленное сверху вниз. В этот момент ток в обмотке *2* начнет уменьшаться по абсолютной величине, а в обмотке *1* появится положительный ток, порождающий магнитное поле, направленное слева направо.

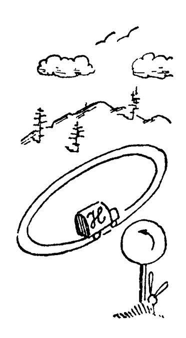
На самом же деле, создаваемые обмотками *1* и *2* магнитные поля в каждый момент складываются и образуют единое магнитное поле, которое в общем случае наклонено относительно осей *1* и *2* и приближается к вертикали, если протекающий в обмотке *2* ток значительно больше тока, протекающего по обмотке *1*, и наоборот.

Вращающееся поле

Н. — Это действительно ужасно сложно. Но я, кажется, понял, что там происходит исключительно странное явление: магнитное поле как бы вращается.

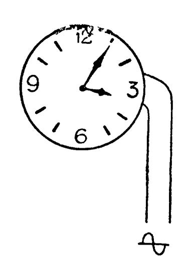
Л. — Не кажется, а на самом деле вращается. Описанным способом мы создали так называемое в р а щ а ю щ е е с я м а г н и т н о е п о л е.

Введи в это поле постоянный магнит, и он будет стремиться вращаться, в каждый момент следуя за перемещающимся полем; причем он будет вращаться с такой же скоростью, что и поле. Таким образом мы создали двигатель, который называют синхронным.



Н. — Просто чудесный двигатель. Он обходится без коллектора: вращающимся элементом служит простой магнит. Да это рекорд простоты. И сверх того он вращается со строго известной скоростью.

Л. — Разумеется, он обладает серьезными достоинствами. Но я должен тебе сказать, что он имеет и не меньшее количество



недостатков. Он может вращаться только со скоростью вращения магнитного поля. Если его заставляют выполнять чрезмерную работу, он уже не может выдержать свою скорость вращения и, как говорят, выпадает из синхронизма и немедленно останавливается. Для нового запуска его иногда приходится раскручивать какой-либо механической системой до хорошей скорости, на которой он может войти в синхронизм. Поэтому я советую использовать этот двигатель в основном в тех случаях, где требуется строго известная скорость вращения, например, для приведения в движение стрелок больших часов от высокостабильной частоты, получаемой от кварцевого генератора с последующим делением частоты. В более обычных случаях я настоятельно рекомендую чаще использовать асинхронный двигатель.

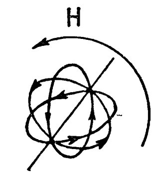
Якорь с короткозамкнутыми витками

Л. — Предположим, что в пространство между полюсными сердечниками с рис. 100 я поместил непрерывный ряд накоротко замкнутых витков из медного провода. Что произойдет?

Н. — Вероятно, ничего.

Л. — Ошибаешься. Разве ты забыл, что представляет собой явление индукции?

Н. — Не забыл, но это мало что изменяет. Твое вращающееся поле, разумеется, будет изменять магнитный поток в витках, в результате чего возникнут токи, но все это создаст лишь колоссальную неразбериху.



Л. — Совсем нет! Вспомни еще раз о противоречивом характере индукции. Возникающие вследствие воздействия наведенных напряжений токи будут воздействовать на поле, в результате чего появятся силы, которые попытаются привести витки в движение. Механические силы попытаются вращать все эти витки со скоростью вращения магнитного поля. В результате магнитное поле станет неподвижным относительно витков и перестанет наводить в них ток. Происходит то, что обычно стремятся сделать магнитные силы, оказывая противодействие изменению породивших их потоков.

Н. — Теперь все представляется мне более или менее понятным. Но я не вижу, чтобы тебе удалось много выиграть по сравнению с синхронным двигателем. Все же значительно проще сделать якорь из простого магнита, чем из такого множества короткозамкнутых витков.

Л. — Прежде всего совсем не проще. Кроме того, новый двигатель обладает весьма существенным преимуществом: он запускается без посторонней помощи. При неподвижном якоре он не дает такого значительного крутящего момента, как двигатель постоянного тока, но тем не менее он способен прийти в движение без пусковых устройств. И затем, если мы попытаемся заставить его выполнить слишком большую работу, он не остановится, просто его якорь начнет вращаться медленнее магнитного поля и в витках появится наведенный ток. Двигатель будет вращаться на скорости, близкой к скорости магнитного поля, и скольжение (сдвиг) относительно этой скорости будет тем больше, чем большую работу мы заставим его выполнять. Следовательно, это намного более гибкий в применении двигатель.

Н. — Я думаю, что двигатель такого типа устанавливают в пылесосах, электрических кофейных мельницах...

Л. — В таких машинах, где требуется большая скорость вращения, чаще всего устанавливают двигатели универсального

типа с коллектором и щетками. Видишь ли, Незнайкин, асинхронный двигатель не может вращаться быстрее магнитного поля, и, следовательно, при обычном переменном токе он дает нам не более 50 оборотов в секунду.

Н. — Но и это представляется мне уже великолепным результатом.

Л. — Но, по мнению специалистов, этого недостаточно для нормальной работы электрической кофейной мельницы, скорость вращения которой должна быть по крайней мере в 3 раза выше (150 оборотов в секунду или 9 000 оборотов в минуту). Вот почему на такие машинки ставят универсальные двигатели. И, наоборот, в тех случаях, когда требуется значительная мощность и определенные удобства в работе, широко используются асинхронные двигатели. В частности, такой двигатель почти всегда приводит в действие стиральную машину. Мы же ограничимся использованием его в устройствах, именуемых сервомеханизмами, о которых нам еще предстоит поговорить. А сейчас мы коротко рассмотрим, каким образом подают ток в двигатели постоянного тока и в асинхронные двигатели.

Питание двигателей

Н. —Само собой разумеется, что значительно проще снабжать энергией асинхронный двигатель. Он требует переменного тока, а усилитель такого типа сделать совсем нетрудно.

Л. — Отчасти ты прав, но при использовании асинхронного двигателя возникает одна небольшая проблема. Ему необходимо подавать два различных тока.

Н. — Я не вижу, почему это тебя беспокоит; мы просто поставим два усилителя.

Л.— Проще питать одну пару катушек переменным током с постоянной амплитудой, а во вторую пару подавать ток со сдвигом фазы относительно первого. Для получения второго тока можно использовать усилитель. Полученное магнитное поле будет вращаться немного неравномерно, но таким образом нам удастся изменять скорость вращения двигателя путем изменения напряжения на выходе усилителя.

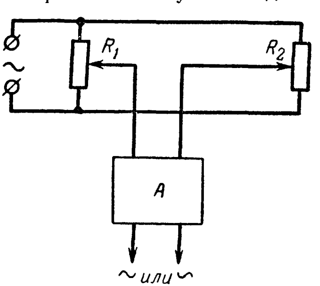


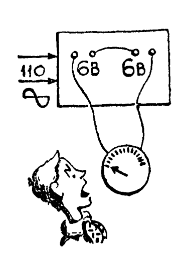
Рис. 102. В зависимости от расположения подвижных контактов потенциометров R_1 и R_2 переменное напряжение на выходе усилителя A находится в фазе или в противофазе с напряжением, приложенным к R_1 и R_2.

Н. — Да, но одно обстоятельство здесь меня беспокоит. Направление вращения такого двигателя невозможно изменить, потому что про переменный ток нельзя сказать, положительный он или отрицательный.

Л. — Совершенно верно, но про него можно сказать, отстает он или опережает на четверть периода ток, протекающий в паре катушек, питаемых непосредственно от сети. Поэтому, изменив полярность выхода усилителя, питающего другую пару катушек, можно изменить направление вращения двигателя.

Н. — Мне неясно, что ты понимаешь под выражением «изменив полярность выхода»... переменный ток всегда переменный!

Л. — Не торопись. Посмотри схему, приведенную на рис. 102...



Н. — Я ее давным-давно знаю, это мост Уитстона.

Л. — О! Сегодня, Незнайкин, ты в превосходной форме. Это действительно мост Уитстона Предположим, что оба подвижных контакта потенциометров R_1 и R_2 находятся в средних положениях, что в этом случае поступит на вход усилителя A?

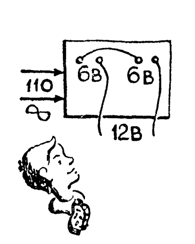
Н. — Но... ровным счетом ничего.

Л. — В самом деле, на вход поступит «нулевое напряжение». А теперь, оставив на прежнем месте подвижный контакт потенциометра R_2, переместим контакт R_1 сначала вверх, а потом вниз. Как ты видишь, подаваемое на вход усилителя напряжение может быть в фазе или в противофазе с напряжением, поступающим на потенциометры.

Н. — Но это скорее смешно! Можно было бы говорить о положительном или отрицательном переменном напряжении.

Л. — Мне этот термин не нравится и я предпочитаю говорить «в фазе» или «в противофазе». Тебе, Незнайкин, вероятно, уже приходилось включать последовательно две вторичные обмотки трансформатора, чтобы получить напряжение, равное сумме напряжений, снимаемых с этих вторичных обмоток?

Н. — Да, я помню о таком случае. Это одно из самых позорных пятен моей карьеры радиста. У меня был трансформатор с двумя вторичными обмотками, дававшими каждая по 6 *в*. Я соединил их последовательно, чтобы получить 12 *в*, но вместо этого я получил напряжение, равное абсолютному нулю.

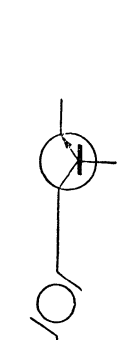


Л. — Значит ты, Незнайкин, включил свои вторичные обмотки последовательно, но в противофазе. Поменяв местами выводы одной из обмоток, ты получил бы 12 *в*. Впрочем тебе повезло, что не было надобности включать эти обмотки параллельно, потому что в этом случае включение в противофазе равносильно настоящему короткому замыканию. Следовательно, как ты видишь, мы можем подавать на вспомогательную обмотку двухфазного двигателя переменное напряжение, способное заставить его вращаться в ту или в другую сторону (в зависимости от фазы этого переменного напряжения) и с большей или меньшей скоростью (в зависимости от амплитуды этого напряжения).

Питание двигателя постоянного тока

Н. — Надеюсь, что при использовании двигателя постоянного тока ты не будешь питать его током транзистора или лампы?

Л. — Я буду тебе очень признателен, если ты сможешь показать закон, запрещающий так поступать. Транзистор как раз очень хорошо подходит для такой работы, так как легче всего сделать двигатель с небольшим количеством витков из толстого провода, иначе говоря, рассчитанный для работы при относительно низком напряжении и большом токе. Поэтому для приведения в действие двигателя широко используются транзисторы.



Но в этом случае необходимо обращать внимание на некоторые моменты. Включая якорь двигателя в цепь коллектора транзистора, мы практически устанавливаем величину протекающего по этому якорю тока (до тех пор, пока на выводах транзистора еще имеется напряжение, т. е. пока транзистор еще не находится в состоянии насыщения). Следовательно, этим самым мы устанавливаем величину даваемого двигателем крутящего момента. Когда транзистор входит в состояние насыщения, т. е. когда на его выводах больше нет напряжения, напряжение на выводах двигателя становится равным напряжению питания и больше повышаться не может. Следовательно, этим ограничивается скорость вращения двигателя.

Н. — Но одно обстоятельство здесь меня беспокоит: двигатель постоянного тока обладает способностью одинаково хорошо вращаться в любую сторону. В этом случае отпадает ужасная проблема с фазой и противофазой, потому что для изменения направления вращения двигателя достаточно изменить направление тока в якоре и оставить без изменения направление тока в статоре. Однако коллекторный ток транзистора может иметь только одно направление. Как решить эту проблему?

Л. — Возможно несколько решений. Так, например, ты можешь привести в действие двигатель усилителем с последовательным пушпульным выходным каскадом, схему которого я показывал тебе на рис. 52. Следует сказать, что это самое простое решение.

Н. — Но есть еще одно беспокоящее меня обстоятельство. В некоторых случаях может потребоваться двигатель очень большой мощности, и я не уверен, что мне легко удастся найти транзисторы, способные пропускать несколько десятков ампер и выдерживать напряжение в несколько сотен вольт.

Электромашинный усилитель



Л. — Найти-то их можно, но стоят они действительно очень дорого. Для этого случая имеется одно изящное решение — использовать в качестве усилителя динамомашину (такое устройство часто называют электромашинным усилителем).

Н. — Скорее расскажи мне, что это такое. Я знаю, что усиливать могут лампы и транзисторы, но я никогда не подозревал, что в качестве усилителя может выступать скромная динамомашина, установленная, как я знаю, под капотом моего автомобиля.

Л. — О, это исключительно просто. Представь себе (рис. 103) динамомашину, приводимую в движение электродвигателем.

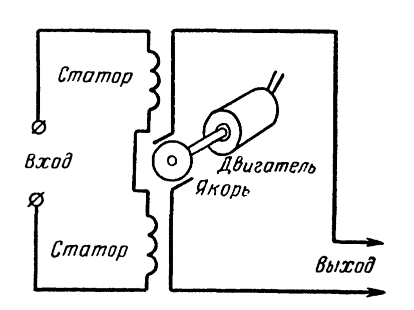


Рис. 103. Динамомашина, приводимая в движение электродвигателем, дает на своих щетках ток, пропорциональный току, протекающему в ее статоре.

Если я не подам тока в обмотку электромагнита, который служит статором динамомашины, то она не даст на щетки никакого тока. Но чем больше тока пошлю я в обмотку статора, тем более высокое напряжение появится на щетках динамомашины. Для получения на щетках динамомашины электроэнергии очень большой мощности достаточно относительно небольшой мощности возбуждения статора. Практически энергию дает электродвигатель, вращающий динамомашину, тогда как протекающий по статору динамомашины ток служит лишь для создания магнитного поля, что возможно достичь затратой небольшой энергии, если согласиться намотать большое количество провода.

Н. — Чудесно! Так, значит, ток с этой динамомашины ты посылаешь в двигатель, которым ты должен управлять, а тран-

зисторный усилитель используешь только для регулирования тока в обмотке статора динамомашины?

Л. — Совершенно верно. В такой системе усилитель, собранный на самых обычных и дешевых транзисторах, позволяет регулировать скорость вращения двигателя мощностью в несколько киловатт. Я уже воспользовался этим методом и с помощью очень скромного усилителя управлял вращением многотонной башни радиолокационной антенны.

Н. — В самом деле очень эффективное решение, но один момент меня очень огорчает! В этом случае ты вынужден устанавливать три машины: двигатель, вращающий динамомашину-усилитель, саму динамомашину и двигатель, в который ты посылаешь ток этой динамомашины. Поистине колоссальное достижение в наш век миниатюризации!

Л. — Ты назвал весьма существенный недостаток системы, но, кроме того, приходится сталкиваться с некоторыми трудностями, возникающими из-за остаточного магнетизма в статоре динамомашины, для устранения которых требуются довольно сложные системы коррекции. Поэтому параллельно разработали другой чрезвычайно хитроумный метод, заключающийся в питании двигателя постоянного тока с помощью тиратронов.

Управление с помощью тиратронов

Н. — Но тогда твой двигатель начнет выделывать пилообразные движения!

Л. — Ты уже наговорил немало ерунды, но до такой колоссальной глупости еще не доходил... Но поговорим серьезно. Действительно, в некоторых схемах, о которых я тебе уже говорил, тиратрон используется для получения пилообразного напряжения. В нашем же случае мы используем тиратрон совершенно иначе — ток тиратрона мы пошлем в обмотку якоря двигателя.

Н. — Да от этого двигатель придет в ужас: ток тиратрона состоит из очень коротких и очень мощных импульсов.

Л. — Так тиратрон ведет себя в схемах генераторов пилообразных сигналов. Но он может работать совершенно иначе, если например, мы используем его основное качество: после зажигания тиратрон начинает пропускать ток и он может продолжать пропускать его, если анодный ток поступает не через конденсатор, а через какой-либо другой прибор.

Н. — Но ты сам себе противоречишь, Любознайкин! Ты неоднократно обращал мое внимание на то, что после зажигания тиратрона проходящий по нему ток может достигать чрезвычайно высоких значений и что для его ограничения необходимо даже принимать специальные меры предосторожности.

Л. — Именно это мы и сделаем. Если в анодную цепь тиратрона последовательно включить резистор и источник напряжения, то после зажигания тиратрона ток будет вести себя исключительно разумно и не превысит установленной для него законом Ома величины. Напряжение на выводах тиратрона будет незначительным и большим на выводах резистора, проходящий по тиратрону ток будет ограничен величиной сопротивления этого резистора.

Н. — Такое применение тиратрона представляется мне довольно странным, но пусть будет так. Мы получили средство направлять ток в двигатель. Но кроме возможности пускать ток в двигатель путем включения тиратрона подачей сигнала на его сетку мы мало что выиграли по сравнению с тем, что могло бы дать нам простое реле.

Л. — Твое замечание совершенно справедливо для тех случаев, когда в качестве источника питания для тиратрона используется источник постоянного напряжения. Но картина станет совсем иной, если питание на двигатель с последовательно ему включенным тиратроном подавать от источника переменного напряжения.

Н. — Я думаю, что здесь ты воспользуешься одним из универсальных двигателей, которые соглашаются работать и от переменного тока?

Л. — Совсем нет, мы используем хороший двигатель постоянного тока и даже с высокостабильным возбуждением статора, если только это не постоянный магнит.

Н. — Мне кажется лучше немедленно уйти отсюда! Ведь ты сам, Любознайкин, говорил мне, что направление вращения такого двигателя зависит от направления тока в его якоре!

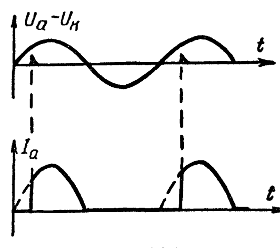


Рис. 104.

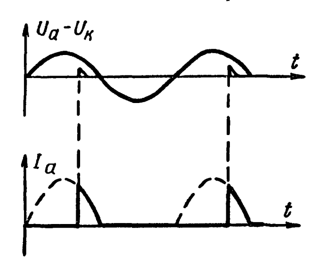
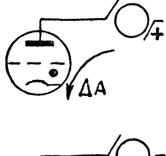


Рис. 105.

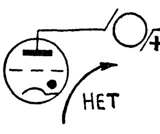
Рис. 104. Если пусковые импульсы подаются на сетку тиратрона примерно в начале полупериода анодного напряжения, то анодный ток протекает в течение большей части этого полупериода; средняя величина анодного тока в этом случае наибольшая.

Рис. 105. Когда пусковые импульсы поступают позднее, средняя величина анодного тока снижается.

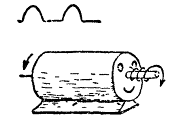
Л. — Пожалуйста, не нервничай. Конечно, в этом случае протекающий по обмотке якоря двигателя ток не будет постоянным, но он по крайней мере будет выпрямленным, потому что тиратрон может ионизироваться только тогда, когда его анод положителен относительно его катода. Следовательно, ток в обмотке двигателя всегда будет протекать в одном направлении, но он будет протекать только в течение половины каждого периода, когда анод тиратрона положителен относительно его катода.

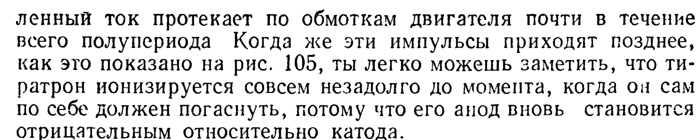


Н. — Хорошо, с этим я согласен. Но я не очень понимаю, что же мы выиграли: если сетка достаточно отрицательна, тиратрон не ионизируется, двигатель не вращается. Если ты сделаешь сетку положительной или хотя бы создашь на ней нулевой потенциал, тиратрон все время будет в ионизированном состоянии и тогда его безболезненно можно заменить простым выпрямителем.



Л. — В своих рассуждениях ты рассматриваешь только крайние случаи и поэтому не замечаешь достоинств нашего устройства, а они есть, и немалые. Предположим, что я посылаю на сетку тиратрона импульсы, но могу изменять момент их прихода в пределах полупериода, когда анод положителен относительно катода. Как ты видишь, когда эти импульсы приходят в самом начале этого полупериода, как это показано на рис. 104, выпрям-





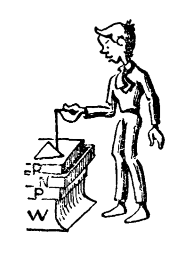
ленный ток протекает по обмоткам двигателя почти в течение всего полупериода Когда же эти импульсы приходят позднее, как это показано на рис. 105, ты легко можешь заметить, что тиратрон ионизируется совсем незадолго до момента, когда он сам по себе должен погаснуть, потому что его анод вновь становится отрицательным относительно катода.

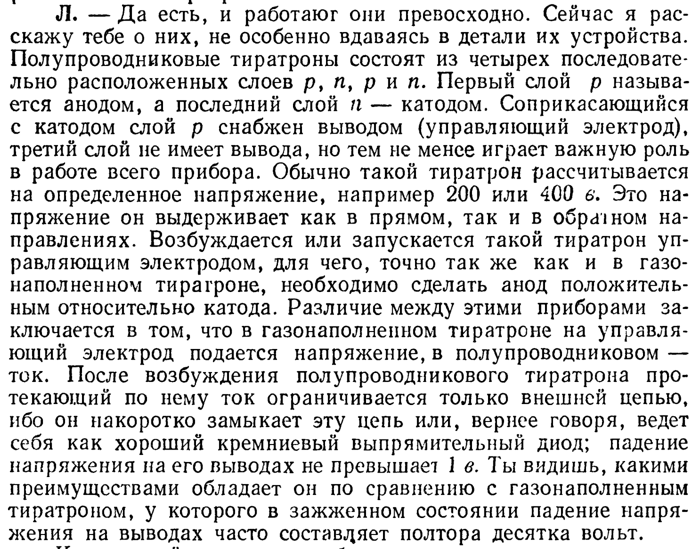
Н. — Так это же настоящая сенсация! Этот тиратрон работает точно так, как выпрямитель, если бы им можно было управлять.

Л. — Именно поэтому его часто называют управляемым вентилем. Впрочем полупроводниковый эквивалент тиратрона тоже называется управляемым кремниевым вентилем и его часто обозначают буквами SCR, представляющими собой сокращение аналогичного английского названия.

Полупроводниковые тиратроны (тиристоры)

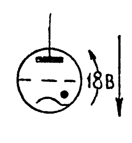
Н. — Значит, есть полупроводниковые приборы, которые работают как тиратроны?

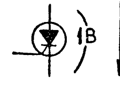




Л. — Да есть, и работают они превосходно. Сейчас я расскажу тебе о них, не особенно вдаваясь в детали их устройства. Полупроводниковые тиратроны состоят из четырех последовательно расположенных слоев *p*, *n*, *p* и *n*. Первый слой *p* называется анодом, а последний слой *n* — катодом. Соприкасающийся с катодом слой *p* снабжен выводом (управляющий электрод), третий слой не имеет вывода, но тем не менее играет важную роль в работе всего прибора. Обычно такой тиратрон рассчитывается на определенное напряжение, например 200 или 400 *в*. Это напряжение он выдерживает как в прямом, так и в обратном направлениях. Возбуждается или запускается такой тиратрон управляющим электродом, для чего, точно так же как и в газонаполненном тиратроне, необходимо сделать анод положительным относительно катода. Различие между этими приборами заключается в том, что в газонаполненном тиратроне на управляющий электрод подается напряжение, в полупроводниковом — ток. После возбуждения полупроводникового тиратрона протекающий по нему ток ограничивается только внешней цепью, ибо он накоротко замыкает эту цепь или, вернее говоря, ведет себя как хороший кремниевый выпрямительный диод; падение напряжения на его выводах не превышает 1 *в*. Ты видишь, какими преимуществами обладает он по сравнению с газонаполненным тиратроном, у которого в зажженном состоянии падение напряжения на выводах часто составляет полтора десятка вольт.

Кремниевый тиратрон возбуждается при токе в несколько миллиампер в его управляющем электроде, после чего он работает как выпрямляющий диод до тех пор, пока в его анодной цепи поддерживается ток, превышающий несколько миллиампер. Для устранения возбуждения достаточно накоротко замкнуть тиратрон, что вызовет падение напряжения на нем ниже одного вольта. Устранить возбуждение также можно, прервав протекающий по нему ток или сделав его анод отрицательным относительно катода, что в принципе сводится к тому же. Чтобы показать, насколько полупроводниковый тиратрон близок к простому выпрямительному диоду, которым можно было бы управлять, для него приняли почти такое же, как для диода, схемное обозначение (я воспроизвел его на рис. 106). Отличие от условного обозначения выпрямительного диода заключается лишь в наличии дополнительного управляющего электрода, подведенного наклонно к катоду.





Н. — А можно ли с помощью полупроводниковых тиратронов управлять большими токами?

Л. — О, да, и очень большими. Вот посмотри этот, что я принес в кармане своей жилетки; ты, несомненно, признаешь, что он совсем небольшой. А его вполне достаточно для исправного управления скоростью двигателя мощностью 2 *квт*, рядом

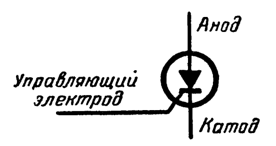
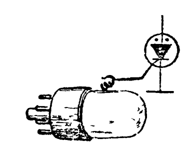


Рис. 106. Условное обозначение твердого тиратрона (полупроводникового эквивалента газоразрядного тиратрона); его также называют управляемым кремниевым выпрямителем.

с которым наш тиратрон почти незаметен. Этот крохотный прибор настолько мал, что я могу зажать в кулаке целый десяток, весит он всего 8 *г*, а выдерживает положительное или отрицательное напряжение 500 *в* и пропускает ток более 20 *а*. Газонаполненный тиратрон с такими характеристиками имеет весьма внушительные размеры: по крайней мере 7—8 *см* в диаметре и полтора десятка сантиметров в высоту. Необходимо сказать несколько слов и о других недостатках газонаполненного тиратрона, как, например, гигантское потребление энергии на разогрев катода и значительное время прогрева перед включением его в работу, без чего мы рискуем серьезно повредить тиратрон.

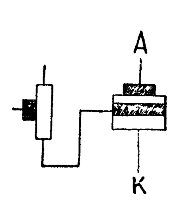


Н. — В таком случае я полагаю, что через несколько лет газонаполненные тиратроны совсем исчезнут.

Л. — Я полностью разделяю это мнение. Однако в настоящее время полупроводниковые модели еще относительно дороги, впрочем они не намного дороже газонаполненных тиратронов с эквивалентными характеристиками, но они легко могут выйти из строя, если не принять специальных мер по защите их от перенапряжений. Но при всем этом будущее за ними.

Зажигание тиратрона

Н. — Хорошо, когда мне придется делать систему управления для двигателей, я непременно применю кремниевые тиратроны. Но еще одно обстоятельство, которое меня немного беспокоит. Ты говорил мне о пусковых импульсах для разного по времени зажигания тиратрона. Как получают эти импульсы и как изменяют их положение (я подозреваю, что здесь ты не скажешь «фазу») относительно начала положительного полупериода на аноде тиратрона?



Л. — Эти импульсы можно получить различными способами. Для возбуждения кремниевых тиратронов часто используют схемы с небольшим специальным транзистором, который называют однопереходным транзистором.

Н. — Мне это очень нравится. Мы хотим возбудить тиратрон, имеющий три перехода, и используем для этого транзистор, который, судя по названию, имеет только один переход. Очень хорошо, это в известной мере восстанавливает равновесие.

Л. — По правде говоря, я никогда не думал о равномерном распределении количества переходов. Но как бы там ни было, однопереходный транзистор представляет собой весьма простой прибор, представляющий собой стержень из кремния с *n* проводимостью, на каждом конце которого имеется вывод (их называют база *1* и база *2*), а в самой середине имеется переход с

p-зоной, который называют эмиттером. Если между базами этого прибора создать разность потенциалов, он ведет себя как тиратрон, анодом которого служит эмиттер, а катодом — одна из баз. Если этот транзистор включить в схему, изображенную на рис. 107, то конденсатор *C* зарядится через резистор R_1 до потенциала электрода, обозначенного стрелкой (его называют эмиттером однопереходного транзистора), и достигнет величины близкой $E/2$. В этот момент скачком вырастет проводимость эмиттерного перехода однопереходного транзистора, и конденсатор быстро разрядится через резистор R_3. Выводы, которые я назвал $Б_1$

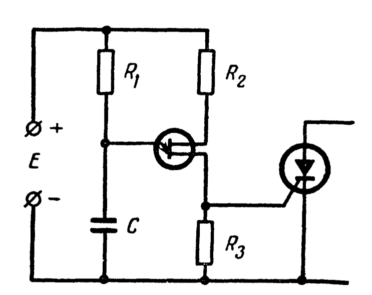


Рис. 107. Схема на однопереходном транзисторе, предназначенная для создания посредством разряда конденсатора *C* через R_3 пусковых импульсов для полупроводникового тиратрона. Разряд конденсатора происходит, когда напряжение на его выводах достигает заданной величины.

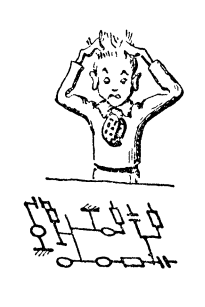
и $Б_2$, на самом деле служат выводами базы этого транзистора, который не имеет коллектора. В момент разряда конденсатора *C* через резистор R_3 на выводах этого резистора появляется напряжение, способное возбудить тиратрон.

Н. — По сути дела, твой однопереходный транзистор представляет собой небольшой тиратрон?

Л. — Действительно, здесь имеется определенная аналогия с тиратроном. Но он может пропускать только небольшие токи. Его можно использовать для получения пилообразного сигнала и еще в ряде других схем, но чаще всего он используется в устройствах для возбуждения полупроводниковых тиратронов.

Н. — Я нахожу, что твой однопереходный транзистор весьма любопытный прибор. Но кое-что меня все же беспокоит. Ты пока еще не сказал мне, как в схеме (рис. 107) ты получаешь импульсы ближе или дальше от начала положительного полупериода напряжения сети. Мне кажется, что твоя система должна давать пилообразный сигнал, никоим образом не связанный с напряжением сети.

Синхронизация с частотой сети переменного тока



Л. — Ты прав. Схема на рис. 107 предназначена для того, чтобы объяснить тебе, как работает однопереходный транзистор и как его подключают к тиратрону. Но если тебе нужна полная схема, пригодная для практического использования, то посмотри на рис. 108; ты легко в ней разберешься.

Н. — И ты решаешься назвать ее легкой! Да твоя схема просто дьявольски сложная.

Л. — Совсем нет, просто, как и в любой схеме, нужно постараться рассматривать один элемент за другим. Ты видишь, что переменное напряжение *U* через нагрузку подается к тиратрону. Через эту нагрузку (ею может быть якорь двигателя) протекает ток тиратрона (в те полупериоды, при которых анод становится положительным относительно катода), когда тиратрон

находится в возбужденном состоянии. Напряжение на выводах тиратрона используется для получения с помощью резистора R_4 и диода Зенера (стабилитрона) напряжения питания для однопереходного транзистора. Как только напряжение на выводах тиратрона становится положительным и по своей величине хотя бы немного выше напряжения диода Зенера, резистор R_4 поддерживает между точками A и B постоянное напряжение, равное напряжению Зенера.

Если напряжение на выводах тиратрона отрицательное (анод отрицателен относительно катода), диод Зенера работает как обычный диод и поддерживает потенциал точки A на уровне, почти равном потенциалу точки B. Следовательно, цепочка однопереходного транзистора теперь питается напряжением, существующим между точками A и B, которое заменяет напряжение E со схемы (рис. 107). Конденсатор C начинает заряжаться точно в тот момент, когда напряжение на выводах тиратрона становится таким, что анод становится положительным относительно катода. Конденсатор перестает заряжаться в тот момент, когда его заряд становится достаточным, чтобы сделать однопереходный транзистор проводящим.

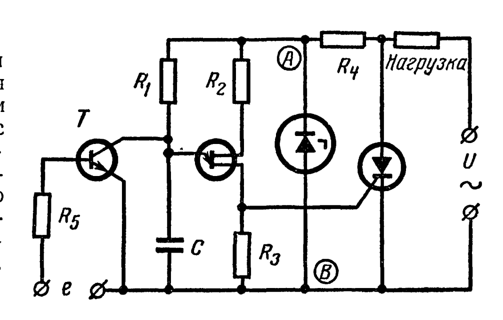
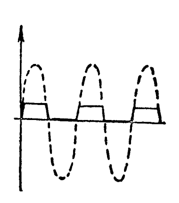


Рис. 108. Полная схема управления средним значением тока в нагрузке с помощью полупроводникового тиратрона, получающего пусковые импульсы от однопереходного транзистора.

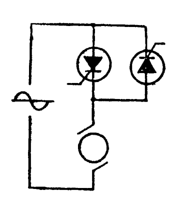
Если транзистор T заперт, конденсатор заряжается быстро и возникающий на выводах резистора R_3 импульс возбудит тиратрон практически уже в начале положительного полупериода. Если же ток от источника e, поступающий на базу транзистора T, не запирает последний, то ток транзистора разряжает конденсатор. Следовательно, конденсатор будет заряжаться медленнее, в результате чего включение однопереходного транзистора, а значит, и возбуждение тиратрона произойдут позднее. Поэтому средний ток, протекающий по тиратрону, будет очень маленький.



Н. — Все это далеко не так просто, как ты говоришь. Но тем не менее я уследил за твоими объяснениями. Однако в этой схеме, как и во всех предыдущих, одно обстоятельство меня огорчает: практически используется только один полупериод переменного напряжения, а другой неизбежно теряется.

Л. — Верно, а если это тебя огорчает, можно использовать два тиратрона, включенных в противоположных направлениях; каждый из этих тиратронов работает только один полупериод. В этом случае понадобится еще два обычных диода, их соединяют с обоими тиратронами так, чтобы токи обоих полупериодов протекали по нагрузке в одном направлении. Как ты видишь, в конечном итоге схема получилась не такой уж сложной и она превосходно может использоваться для управления двигателями очень большой мощности.

Н. — Мне очень хочется тебе верить, но остался еще один и, по-видимому, последний беспокоящий меня вопрос: проходящий по двигателю ток резко возрастает и, если мы хотим его уменьшить, то уменьшаем время протекания тока по тиратрону и, следовательно, по обмотке двигателя. Не следует ли нам приготовиться к перенапряжениям, порождаемым явлением самоиндукции, а затем к реакции двигателя, которому явно не понравятся такие резкие скачки?



Л. — Что касается двигателя, то я могу лишь выразить ему свое соболезнование. У меня есть один двигатель, работающий в таких условиях, но он ни разу не приходил жаловаться. Твое замечание относительно вызываемых самоиндукцией напряжений значительно серьезнее. Эти перенапряжения действительно могут нам мешать, во всяком случае они несколько осложняют работу системы, хотя и не требуют внесения значительных изменений в показанную мною схему, которая весьма близка к применяющейся на практике.

Н. — Я вижу, что твой двигатель приспосабливается к навязанным ему условиям, но я чувствую, что мой мозг очень близок к насыщению, и считаю целесообразным перенести продолжение беседы на завтра.

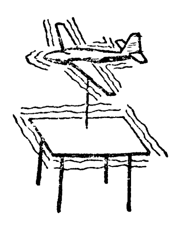
■

Беседа одиннадцатая

После ознакомления с двигателями Незнайкин желает узнать, что такое ультразвук и как его производят. Перейдя к модулированию источников света и применению такой модуляции в фототелеграфии, Незнайкин знакомится с прибором, перед которым большое будущее, — с лазером.

Генераторы ультразвука. Модуляторы света и лазеры

Виброгенераторы

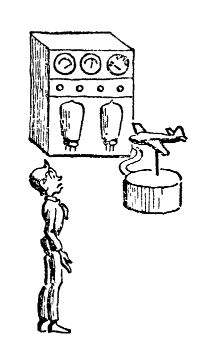


Незнайкин — Дорогой Любознайкин, мне очень хочется услышать от тебя хотя бы несколько слов еще об одном типе восстановителей. Один из моих приятелей, работающий на авиационном заводе, рассказал мне, что предназначенные для установки на самолете небольшие хрупкие приборы подвергают испытанию на вибрационном столе, приводимом в действие мощным усилителем. Так скажи мне, что это такое?

Любознайкин — Ты знаком с этим прибором, хотя сам и не подозреваешь об этом. Это просто очень большой громкоговоритель с подвижной катушкой. В междуполюсный зазор его громадного магнита помещают катушку, в которую посылают ток усилителя. Эта катушка сообщает соединенным с ней деталям колебательное движение с частотой протекающего по ней тока.

Н. — Но тогда я сам могу сделать виброгенератор. В одном из ящиков моего шкафа валяется громкоговоритель, которым я уже давно не пользуюсь, так как у него разорвался диффузор.

Л. — Ты, конечно, можешь им воспользоваться, но обычно виброгенераторы обладают поистине гигантской мощностью по сравнению с твоим громкоговорителем. Ты, несомненно, можешь себе представить, какая мощность нужна, чтобы трясти (да еще со значительной амплитудой) большую стальную плиту, на которой установлены испытываемые приборы или детали. Я, например, бываю на одной испытательной станции, где управляющий вибростолом усилитель способен давать мощность до 80 *квт*.



Н. — Ты буквально меня ошеломил; разумеется, с моим пятиваттным усилителем мне ровным счетом нечего делать.

Л. — Мне следует внести поправку в твое высказывание. Ты можешь подвергнуть испытаниям небольшие и легкие предметы, сообщая им колебательные движения относительно низкой частоты с умеренной амплитудой. Большие амплитуды вибрации трудно получить на высоких частотах, не вгоняя в катушку генератора чудовищную мощность.

Н. — Понятно, но одно обстоятельство меня беспокоит. Генератор не может превратить всю получаемую энергию в механическую. Куда она девается?

Л. — Наибольшая часть получаемой энергии превращается в теплоту и рассеивается. Поэтому виброгенераторы больших размеров необходимо оснащать очень эффективными системами

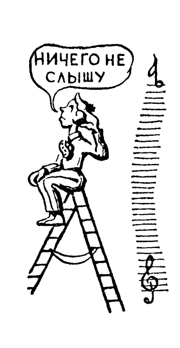
охлаждения. Вибростол, который я видел, с его усилителем 80 *квт* при применении соответствующих коррекций мог бы стать системой высококачественного воспроизведения звука, какой ты никогда не слышал. Исключительно внушительное впечатление произвела бы стальная плита площадью в половину квадратного метра и толщиной в несколько миллиметров, испускающая звуки вальса Шопена, но ты представляешь, какая мощность нужна для раскачки такой плиты, чтобы она наподобие диффузора громкоговорителя вибрировала с порядочной амплитудой на частоте 3 или 4 *кгц*.

Н. — Для воспроизведения музыки меня устроит классический бумажный диффузор, требующий всего лишь несколько ватт. Я также согласен, что мой громкоговоритель не способен сотрясать до разрушения даже мелкие предметы. Но скажи, пожалуйста, как точно узнать усилия, которым подвергаются испытываемые предметы?

Л. — Ну, это очень легко. Рядом с испытуемым аппаратом устанавливают небольшие системы, именуемые акселерометрами, о которых я тебе уже говорил.

Ультразвук

Н. — А какую частоту можно получить от виброгенератора?



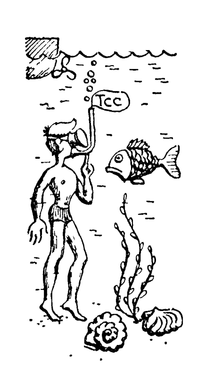
Л. — О, совсем нет надобности превышать десяток килогерц. И даже до такой частоты доходят очень редко. При желании сообщить какому-либо телу более быструю вибрацию практически попадешь в область ультразвука.

Н. — О нем я уже слышал. Я думаю, что ультразвук представляет собой звуки такой высокой частоты, что их нельзя слышать, иначе говоря, это звуки с частотой выше полутора десятков килогерц.

Л. — Совершенно верно. Диапазон ультразвуков очень широк; он простирается от полутора десятков килогерц до нескольких мегагерц.

Н. — Я предполагаю, что для получения ультразвука потребуются совершенно необычные громкоговорители.

Л. — Ультразвук небольшой мощности на частотах до 100 *кгц* ты легко можешь получить с помощью одного из тех маленьких электростатических громкоговорителей, которые используются в качестве «пищалок» в системах высококачественного воспроизведения звука. Ты можешь также воспользоваться ионным громкоговорителем, который позволяет получить довольно высокие частоты. Но необходимо отметить, что в практической жизни громкоговорителями очень редко пользуются для получения ультразвука. Я хочу также обратить твое внимание на то, что ультразвук очень плохо распространяется в воздухе, поэтому его чаще используют в жидких и твердых средах и крайне редко в воздухе.



Н. — Вот еще! Надеюсь, ты не станешь убеждать меня, что ультразвук может распространяться в жидкости или в твердых телах?

Л. — Конечно, стану, хотя ты и не согласен. Почему ты думаешь, что ультразвук не может распространяться в жидкости и твердых телах, если обычные звуки превосходно там проходят? Ты вероятно уже заметил, что во время ныряния очень хорошо слышен шум винтов кораблей, проходящих очень далеко от тебя. Ультразвук распространяется в воде еще лучше. Благодаря короткой длине волны ультразвук можно легко сконцентрировать в узкий пучок и благополучно послать на

порядочное расстояние. Но как я тебе уже сказал, для получения ультразвука очень редко пользуются приспособлениями типа громкоговорителей.

Н. — Но я совершенно не представляю, чем, кроме громкоговорителя, можно создавать ультразвук.

Л. — Два основных метода основаны на использовании пьезоэлектричества и магнитострикции.

Н. — Если ты и дальше будешь бросаться подобными словами, мне лучше немедленно уйти.

Пьезоэлектрические генераторы ультразвука

Л. — Успокойся, Незнайкин. Пьезоэлектричество — это свойство некоторых кристаллов порождать электрическое напряжение при механическом воздействии на них. С этим явлением ты уже знаком, так как пьезоэлектрические звукосниматели получили широкое распространение. Явление это обратимо, иначе говоря, при приложении электрического напряжения к двум электродам, соответствующим образом расположенным на кристалле, последний деформируется. С помощью кристалла такого типа (например, кварца) и создают ультразвук: на кристалл подают переменное электрическое напряжение ультразвуковой частоты, и кристалл начинает вибрировать с той же частотой.

Н. — Но это же чудесный прибор! Он может служить вместо громкоговорителя. После твоих объяснений я предполагаю, что он должен очень хорошо воспроизводить высокие частоты.

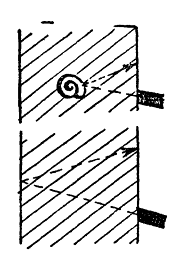
Л. — И даже очень высокие. Однако низкие частоты он воспроизводит очень плохо, так как для получения звуков низкой частоты необходима большая амплитуда, а амплитуда деформации кристалла невелика. Она настолько мала, что производимый ультразвук не удалось бы обнаружить даже специальными приспособлениями, если бы не использовали явление резонанса. Как ты знаешь, кристалл имеет собственную частоту колебаний[1]. На этой-то частоте и возбуждают кристалл. Тогда амплитуда колебаний становится больше. Чтобы послать ультразвук в жидкость, кристалл погружают в эту жидкость; при надобности послать ультразвук в твердое тело кристалл прижимают к этому предмету, а между ними для обеспечения хорошего контакта наносят тонкий слой жидкого масла.

Н. — Прости мой вопрос, а зачем нужно посылать ультразвук в жидкости или в твердые тела?

Л. — Направленный в жидкость ультразвук обладает свойством превращать вещества в коллоидные суспензии. Он также убивает микроорганизмы, благодаря чему он может использоваться для стерилизации растворов, но этот метод пока еще не получил широкого распространения. Ультразвук позволяет также получать чрезвычайно однородные смеси из компонентов, которые обычно не смешиваются. Если ты, например, направишь пучок ультразвука в сосуд с водой, на дне которого находится ртуть, то увидишь, как ртуть разобьется на мельчайшие капельки, которые смешаются с водой и образуют своеобразную серую суспензию, и пройдет очень много времени, прежде чем ртуть осядет на дно. В твердые тела ультразвук часто направляют

---

[1] Кристалл имеет множество резонансных частот, которые зависят от размеров кристалла, типа колебаний и ориентации пластинки, вырезанной из естественного кристалла. (*Прим. ред.*).



с целью обнаружения скрытых дефектов. Для этого в обследуемый предмет направляют узкий пучок ультразвука; встречая дефекты (трещины или раковины), ультразвук отражается обратно, и по наличию таких отраженных сигналов можно без разрушения самого предмета судить о наличии в нем скрытых изъянов. Об этом методе мы поговорим позднее. Кроме того, подобно радиоволнам в воздухе или вакууме, ультразвук можно использовать в воде для связи. Ультразвук позволяет также обнаружить препятствия в воде, найти в море косяки рыбы, чтобы знать, где ее ловить. Ультразвук, как ты сам легко можешь догадаться, применяется и в военном деле.

Н. — А как устроен генератор ультразвука? Ты говорил мне о кристалле, но мне хотелось бы знать, как его используют.

Ультразвуковые излучатели малой мощности

Л. — Существует несколько способов генерирования ультразвука. В генераторах малой мощности используют кварцевую пластину. Одна ее сторона металлизирована, а другая омывается изолирующей жидкостью, например нефтью. С этой стороны на очень небольшом расстоянии от пластины размещен своеобразный поршень, который служит вторым электродом. Такой генератор в разрезанном виде я изобразил для тебя на рис. 109.

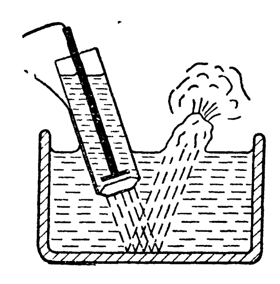
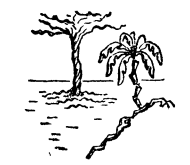


Рис. 109. Укрепленная на конце ультразвукового излучателя кварцевая пластинка приходит в колебательное движение и посылает в воду пучок ультразвука. Ультразвук отражается от дна сосуда, и давление излучения образует на поверхности воды небольшой гейзер.

Как ты видишь, поршень находится очень близко от задней поверхности кварцевой пластины, но никогда ее не касается.



Н. — Я достаточно хорошо вижу устройство твоей системы. Но я совсем не понял, почему на поверхности воды, справа от ультразвукового излучателя (если ты позволишь мне так его называть) ты нарисовал небольшой фонтанчик.

Л. — Твой термин «излучатель» совершенно правильный и им часто пользуются. А маленький фонтанчик изображает явление, которое происходит на самом деле, и ты его сам можешь увидеть. Пучок ультразвука выходит из излучателя строго перпендикулярно нижней металлизированной поверхности кристалла. Он доходит до дна сосуда с водой, отражается от него и выходит на поверхность. Когда в воду направляют ультразвук большой энергии, частицы, подвергающиеся его воздействию, отбрасываются назад. Это довольно сложное явление называется давлением излучения. Если идущий снизу пучок ультразвука достигает поверхности, то над поверхностью образуется небольшой гейзер с короной из водяной пыли.

Н. — А что случится, если я суну руку в пучок ультразвука?

Л. — Ты ее немедленно отдернешь. У тебя будет такое впечатление как будто с руки содрали кожу, а затем опустили

в серную кислоту. Кроме того, одновременно возникает ощущение ожога. Впрочем, это полезное предупреждение, потому что нельзя допускать, чтобы ультразвук такой мощности действовал на организм человека. Он может разрушить клетки или кровяные тельца

Н. — Скажи, пожалуйста, я никогда не думал, что ультразвук так опасен. Но я слышал, что ультразвук предлагают использовать для стирки белья. Должен сознаться, что в этом деле я ровным счетом ничего не понимаю, но мне представляется это очень опасным, если не для белья, то для женщин, которые решатся воспользоваться таким методом стирки.



Л. — Успокойся, Незнайкин, в этом случае используется ультразвук небольшой мощности. А кроме того, соответствующее устройство отключит генератор ультразвука, как только прачка снимет крышку, чтобы сунуть руку в бак. Ультразвуковая стиральная машина должна быть достаточно эффективной (в настоящее время ультразвук используют для очистки мелких деталей и получают прекрасные результаты). При стирке белья ультразвук должен помочь составу проникнуть в поры ткани. Впрочем мне кажется, что пока этот метод не получил широкого распространения, но у него открываются несомненно интересные перспективы.

Излучатели большой мощности

Н. — Так, значит, всегда пользуются излучателем такого типа, что ты изобразил на рис. 109.

Л. — Нет, особенно в тех местах, когда нужно получить ультразвуковой пучок большей мощности, приходится пользоваться иными способами. Для мощного генератора требуется более толстая кварцевая пластинка, а этот материал относительно редкий и дорогой. Поэтому нашли очень интересное решение, получившее название «сэндвича Ланжевена»[1]. Это устройство представляет собой тонкую кварцевую пластину, зажатую между двумя пластинами из материала, в котором звук распространяется с такой же скоростью, что и в кварце. К счастью, такому требованию отвечает сталь, и мощный генератор делают из двух толстых стальных пластин, разделенных одна от другой тонкой пластиной кварца. Впрочем, кварцевую пластину можно собрать из нескольких кусков при условии, что все они имеют одинаковую толщину и вырезаны одинаково относительно оси кристалла.

Н. — По совести говоря, этот сталекварцевый сэндвич не очень-то годится для завтрака!

Л. — Косвенно он служит нам и для завтрака. Дело в том, что эта система используется на кораблях для излучения ультразвуковых импульсов, предназначенных для обнаружения не только подводных лодок, но и косяков рыбы.



Н. — Теперь я хорошо понял, как получают ультразвук с помощью пьезоэлектричества. Но ты мне говорил и о другом способе, носящем не менее заковыристое название.

Л. — Ты хочешь поговорить о магнитострикции. Это относительно простое явление заключается в следующем: у некоторых магнитных материалов под воздействием электрического поля изменяется длина. Если такие материалы поместить в переменное магнитное поле, наложенное на постоянное, и если частота

---

[1] Поль Ланжевен — выдающийся французский физик (*Прим. ред.*).



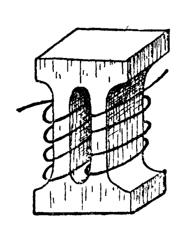
переменного поля соответствует резонансной частоте материала, то мы получим ультразвуковые колебания.

Н. — А зачем ты накладываешь переменное магнитное поле на постоянное?

Л. — Система в известной мере напоминает магнитные громкоговорители. Стержень сжимается как при одном, так и при обратном направлении магнитного поля, но при нулевом поле сжатие почти невозможно обнаружить. Постоянное магнитное поле создает своеобразное магнитное смещение, обеспечивающее эффективность всей системы.

Н. — А какие материалы обладают этим свойством?

Л. — Например, стальные или никелевые листы, но последнее время все чаще используют некоторые ферриты, обладающие таким свойством. Эти материалы позволяют очень экономично получать довольно мощные ультразвуковые пучки в диапазоне частот, только в редких случаях превышающих 50 *кгц*. Для получения ультразвука более высоких частот лучше подходит кварц.



Н. — А какую форму имеет такой кусок феррита?

Л. — Обычно ему придают форму стержня или замкнутого сердечника, чтобы облегчить циркулирование магнитного потока. Очень важно, чтобы обе конечные плоскости были ровными и строго параллельными. Благодаря этому проходящая по стержню ультразвуковая волна правильно отражается от его плоскостей и образует колебания типа стоячей волны. Каждый раз, когда эта волна сталкивается с граничной плоскостью, часть энергии вырывается во внешнюю среду, а остальная часть отражается внутрь феррита. Благодаря этой отраженной части энергии и поддерживаются колебания типа стоячей волны.

Фототелеграфия

Н. — Что происходит в ферритовом стержне, я понял. Но скажи, пожалуйста, Любознайкин, нельзя ли попытаться использовать в восстановителе какие-либо иные явления, кроме ультразвука? Что, если подумать о применении света? Можно ли получить свет какими-нибудь другими способами кроме старой доброй лампы накаливания?

Л. — О, да, и целое множество! В первую очередь следует сказать об ионных лампах, в которых через газ пропускают поток ионов. Такая система неизмеримо лучше лампы накаливания способна воспроизводить быстрые изменения света. Именно такая лампа используется для передачи фотографий на расстояние по методу, который изобрел Эдуард Белин. В честь этого инженера фототелеграфию во Франции называют белинографией.

Передаваемая фотография укрепляется на равномерно вращающемся цилиндре (рис. 110), строго определенная скорость вращения которого задается кварцем. Фотоэлемент *Ф* просматривает изображение вдоль линии пересечения плоскости, перпендикулярной оси цилиндра с его поверхностью, а точнее по спирали, выписываемой на цилиндре точкой, просматриваемой фотоэлементом, который медленно перемещается параллельно оси цилиндра.

Н. — Дорогой Любознайкин, ты совершенно напрасно объясняешь так подробно. Этот тип разложения изображения настолько напоминает обычное телевидение, что мне все очевидно.

Л. — Тем лучше. Созданный фотоэлементом сигнал передается по телефонной линии; на приемной стороне после со-

ответствующего усиления сигнал подается в ионную лампу, которая создает более или менее яркое пятнышко света на приемном цилиндре. Этот цилиндр абсолютно идентичен цилиндру на передающем конце, но вместо фотографии на нем укреплена чистая фотобумага, из-за чего он помещен в темную камеру. Приемный цилиндр вращается с такой же скоростью, что и передающий (здесь полагаются на высокую точность и стабильность кварца). С помощью соответствующего синхронизирующего сигнала движение приемного барабана происходит в фазе

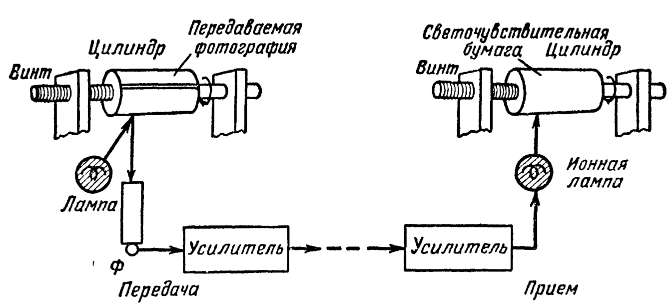


Рис. 110. При передаче документа по фототелеграфу его укрепляют на цилиндре, который вращается и одновременно медленно перемещается вдоль своей оси перед фотоэлементом; благодаря такому движению цилиндра фотоэлемент точку за точкой просматривает весь документ. На приемной стороне лампа переменной яркости свечения воспроизводит документ на светочувствительной бумаге, двигающейся перед ней точно так же, как передаваемый документ движется перед фотоэлементом.

с движением передающего барабана. Световое пятно перемещается по линии, параллельной оси цилиндра, с такой же скоростью, что и фотоэлемент на передающем конце. После завершения приема бумагу с цилиндра проявляют и получают готовую фотографию.



Н. — Но одну штуку я здесь совсем не понимаю. Некогда, рассказывая о телевидении, ты неоднократно подчеркивал, что для передачи изображения необходима гигантская полоса пропускания, измеряемая в мегагерцах. А теперь ты говоришь мне о передаче изображения по телефонной линии. Этого я понять не могу.

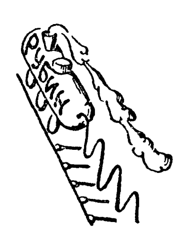
Л. — В телевидении каждое изображение (его там называют кадром) передается за $^1/_{25}$ долю секунды. Передача фотографии по методу Эдуарда Белина продолжается от 7 до 15 *мин*. Как ты видишь, можно значительно сократить полосу пропускания и поэтому воспользоваться телефонной линией.

Н. — Согласен, но точность воспроизведения получается весьма относительной. Теперь мне понятно, почему телефотографии, которые мы время от времени видим в газетах, отличаются таким плохим качеством.

Л. — Фототелеграф, Незнайкин, здесь ни при чем. Я могу показать тебе одновременно оригинал и копию, полученную с него на расстоянии 600 *км*, и я не убежден, что даже с лупой тебе удастся найти, которая из них копия. Дело в том, что по фототелеграфу обычно передают сверхсрочную информацию и в типографиях с них очень ускоренным методом изготовляют клише, что и приводит к большим искажениям в газетах.

Н. — Хорошо, теперь я не буду плохо отзываться о телефотографиях. Но скажи мне, Любознайкин, нельзя ли получать свет другим способом?

Лазер



Л. — О, конечно можно. Я расскажу тебе о созданном в последние годы многообещающем методе; я имею в виду лазер, название которого образовано из первых букв его определения на английском языке (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Н. — Я кое-что слышал об этом приборе, мне даже сказали, что им можно создавать лучи смерти.

Л. — Как я вижу, Незнайкин, ты черпаешь свои знания в падкой на сенсации прессе. Не исключена возможность, что в отдаленном будущем кое-что из таких сообщений, к сожалению, окажется правдой. На сегодня лазер может дать прекрасно

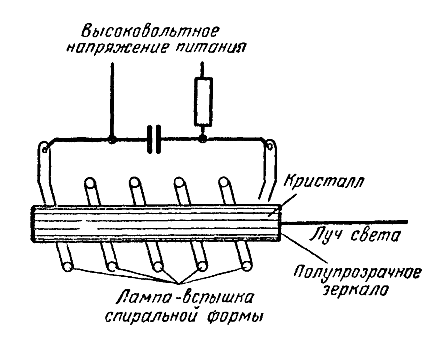


Рис. 111. В лазере на твердом теле лампа-вспышка спиральной формы размещается вокруг кристалла; излучаемый ею свет возбуждает атомы кристалла. Отдавая полученную энергию, эти атомы порождают луч света, для которого кристалл со своими плоскими и параллельными торцами служит оптическим резонатором.

сфокусированный световой луч, который благодаря его острой направленности можно посылать на очень большие расстояния. Лазер несколько напоминает ультразвуковой генератор, о котором мы уже говорили. Основой прибора служит прозрачный стержень из материала типа рубина. Торцы этого стержня строго параллельны и хорошо отполированы. Эти плоскости отражают внутрь возникающий при определенных обстоятельствах в кристалле свет, а часть его пропускают наружу. Вокруг этого кристалла (рис. 111) располагают очень мощный источник белого света, например лампу-вспышку, аналогичную той, которой ты пользуешься при фотосъемке. Вспышку света в таких устройствах получают, направляя разряд очень высоковольтного конденсатора большой емкости в лампу с ионизированным газом.

Н. — Так из кристалла вырывается свет лампы-вспышки! Но тогда в твоем лазере нет ничего нового.

Л. — Ты ошибаешься. Световая энергия порождается кристаллом. Энергия лампы-вспышки, поданная кристаллу в виде света, называется энергией накачки и вызывает внутри этого кристалла активацию некоторых атомов, иначе говоря, переводит их на более высокий энергетический уровень. Затем эти атомы отдают свою энергию и переходят на более низкий энергетический уровень. Эта выделившаяся энергия и излучается в виде света Кристалл со своими полированными и строго параллельными торцами представляет собой высокодобротный резонатор. Возникший таким образом свет излучается через один из торцов в виде пучка строго параллельных лучей[1].

Н. — А по своей мощности излучаемый кристаллом свет равен мощности лампы-вспышки?

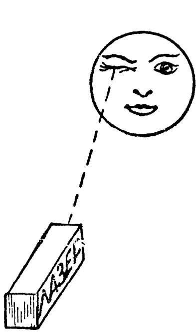
Л. — Намного меньше, но лазер обладает одним очень ценным качеством: он дает так называемый когерентный свет. В отличие от света, излучаемого накаленными телами или ионизированными газами, этот свет состоит из одного пакета волн, создающего колебания в течение значительного отрезка времени. При других способах получения света световая энергия излучается в виде большого количества очень коротких по времени колебаний, каждое из которых представляет собой очень короткий пакет волн (несколько сантиметров, что, учитывая скорость света, соответствует очень короткому интервалу времени) без какого бы то ни было согласования фазы.

В отличие от этого испускаемый лазером свет по своей структуре аналогичен электромагнитной волне, излучаемой антенной. Существуют также газовые лазеры, в которых специальным образом подобранный газ помещается в более или менее длинную трубку с полупрозрачными строго ровными и параллельными торцевыми плоскостями. Этот газ возбуждается небольшим электрическим разрядом наподобие люминесцентных ионных ламп. Но в отличие от них лазер излучает когерентный свет. Строго параллельный лазерный луч света можно сконцентрировать линзой настолько, что полученная энергия в пересчете на 1 *см*² окажется огромной. Сконцентрированный таким образом лазерный луч почти мгновенно пробивает тонкую стальную пластинку. Именно этот эксперимент породил идею создания разрушительного лазерного оружия, которое, к счастью, до сих пор осталось проектом, но которое, к сожалению, когда-нибудь может стать ужасной реальностью.

Применения лазера

Н. — Этот лазер представляется мне очень скверным инструментом. Какой интерес он может представлять для нас?

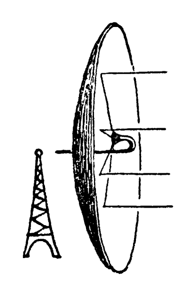
Л. — Он интересен тем, что может излучать модулированный свет и с большой точностью посылать этот свет на сверхбольшие расстояния. С помощью такого инструмента удалось осветить заданную точку на Луне и при этом, несмотря на путь в 380 000 *км*, не произошло значительного рассеяния световых лучей.



Н. — Прибор становится интересным. А разве нельзя таким же образом сконцентрировать радиоволны?

Л. — В принципе можно, но на практике осуществить неизмеримо труднее. Не забывай, Незнайкин, что возможность

[1] Частота излучаемого света определяется разностью энергий между верхним и нижним уровнями. (*Прим. ред.*).



сконцентрировать излучение в узком пучке зависит от соотношения размеров концентрирующего устройства и длины волны концентрируемого излучения. Иначе говоря, лазер, излучающий свет с длиной волны 0,7 *мкм*, позволяет получить при кристалле диаметром 5 *мм* такую концентрацию, для достижения которой при излучении с длиной волны 10 *см* потребовался бы рефлектор диаметром 700 *м*. Кроме того, световое излучение имеет чрезвычайно высокую частоту и может модулироваться значительной полосой частот. Один лазерный луч способен одновременно передать сотни тысяч телевизионных программ или несколько миллиардов телефонных разговоров, этого более чем достаточно для одновременного установления связи между всем населением нашей планеты... А теперь мы поговорим о восстановителях, дающих нам на выходе нематериальные величины.

Н. — Вот это да, Любознайкин! Так ты свободно плаваешь на вершинах высших сфер философии!

Электроннолучевые трубки

Л. — Незнайкин, для начала мне очень хотелось, чтобы ты дал мне определение вершины сферы. Затем, если уж плавать, то я предпочел бы ровную поверхность воды. Но успокойся, когда я говорю о нематериальном восстановлении, я имею в виду восстановитель, в котором ничто материальное не движется (свет в известной мере подходит под этот случай)[1]. В настоящую минуту я всего лишь имею в виду осциллографическую электроннолучевую трубку, в которой восстановитель (им в этом случае служит электрическое поле, создаваемое выходным напряжением осциллографа) воздействует только на электроны.



Н. — Да, но электроны вполне материальны!

Л. — Ты так считаешь? Вот тебе ведро, ступай набери электронов!

Н. — Я хотел сказать, что они составная часть материи. Что же ты собираешься делать с этими электронами?

Л. — Я возьму специальную трубку и так сконцентрирую вылетающие с катода электроны, чтобы они в виде узкого пучка попадали точно в заданное место днища колбы, покрытого, как ты знаешь, слоем флюоресцирующего состава, который светится при попадании на него электронов. Созданное таким образом световое пятно мы можем перемещать в любую сторону с помощью электрических полей, создаваемых внутри трубки отклоняющими пластинами.

Н. — Послушай, Любознайкин, я очень хорошо знаю эту систему и не думаю, что здесь ты можешь рассказать мне что-нибудь новое.

Л. — Стоит тебе немного познакомиться с каким-либо вопросом, как у тебя немедленно складывается впечатление, что ты уже досконально изучил всю проблему. А ведь об электронном осциллографе можно так много рассказать. Но для начала я позволю себе спросить тебя, как бы ты стал делать осциллограф на одних транзисторах (разумеется, за исключением самой электроннолучевой трубки)?

Н. — О! В этом случае нужно взять хорошие транзисторы, выдерживающие достаточно высокие напряжения, и собрать усилители и генераторы развертки по более или менее обычным схемам.

---

[1] Речь, по-видимому, идет об отсутствии механически подвижных частей. (*Прим. ред.*)

Высокочувствительные трубки

Л. — Согласен. Но признайся, что твои транзисторы с трудом выдержат на коллекторах напряжение более 40 или 50 *в*, особенно при необходимости отдать некоторую мощность, а именно такие условия складываются, когда необходимо получить значительную полосу пропускания. При использовании обычной электроннолучевой трубки с чувствительностью к отклонению порядка 0,3 *мм/в* выходное напряжение такого усилителя может сместить световое пятно не более чем на 20 *мм*. Воспользовавшись симметричной схемой, можно увеличить максимальное отклонение луча вдвое, но я не рекомендую тебе заставлять транзисторы работать при напряжении 60 *в*. Лучше всего остановиться на обычном для транзисторов напряжении, а именно на 20 *в*, но в этом случае тебе придется в лупу следить за перемещением твоего светового пятна по экрану.

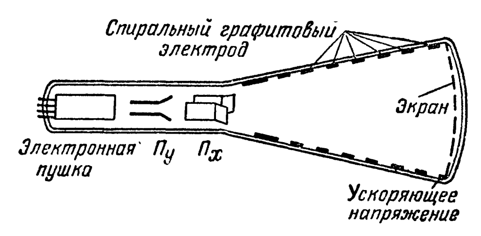
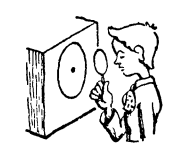


Рис. 112. В электроннолучевой трубке с послеускорением вылетевшие из пушки и направленные отклоняющими пластинами электроны затем многократно ускоряются электрическим полем, создаваемым в трубке послеускоряющим высоким напряжением, приложенным к спиральному графитовому электроду.

Н. — Я признал бы положение безвыходным, если бы не привык видеть, как ты решаешь казалось бы неразрешимые проблемы. И поэтому я жду чуда.

Л. — Благодарю тебя за доверие. Но здесь дело не в чуде, а в значительном техническом прогрессе электроннолучевых трубок. Конструкторам удалось после отклонения электронного луча многократно ускорить электроны луча электрическим полем, создаваемым напоминающим спираль анодом, нанесенным на внутренней поверхности раструба колбы (рис. 112). Это, наряду с усовершенствованием конструкции отклоняющих электродов, позволило повысить чувствительность электронного луча к отклонению до 5 *мм/в* и даже больше. В этих условиях, используя транзисторы при нормальном для них напряжении питания, можно очень легко заставить луч перемещаться по всему экрану трубки.



Н. — Как досадно, что этих трубок не знали раньше! Они оказались бы очень практичными для усилителей на лампах с подогревными катодами. Но один вопрос меня серьезно беспокоит: скажи, пожалуйста, какую полосу пропускания способны обеспечить эти осциллографы на транзисторах?

Стробоскопический осциллограф

Л. — Я знаю современные осциллографы, обладающие полосой пропускания около 20 *Мгц*, что не так плохо. Но следует, признать, что, даже мобилизуя все достижения техники, очень

трудно сделать полосу пропускания шире 50 или 80 *Мгц*. Но для наблюдения еще более быстрых явлений при условии, что они периодические, очень интересным решением может служить стробоскопический осциллограф.

Н. — Что это за инструмент? Я о нем ничего не слышал.

Л. — Это просто осциллограф, в котором использован стробоскопический эффект. Ты с ним знаком? Если вращающийся диск освещать короткими вспышками света, давая вспышки через равные промежутки времени по одной на каждый оборот, то вследствие инерции зрительного восприятия диск покажется нам неподвижным. Если несколько уменьшить частоту вспышек, то при каждой новой вспышке изображение диска немного смещается относительно предыдущего положения и у нас складывается впечатление, что диск вращается очень медленно.

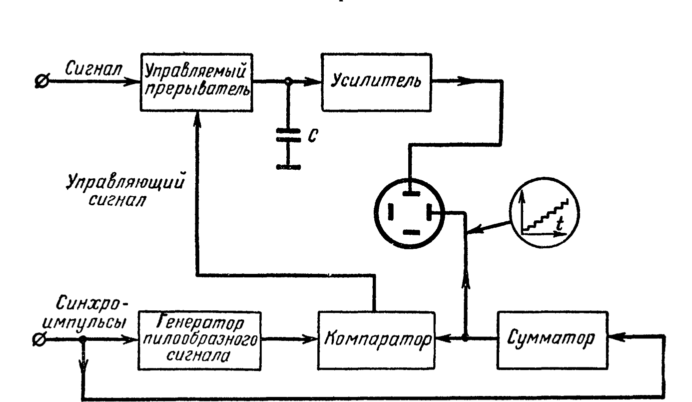
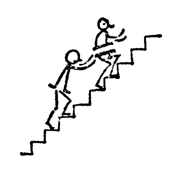


Рис. 113. Блок-схема стробоскопического осциллографа, позволяющего как бы из кусочков собрать кривую, характеризующую форму периодического сигнала.

Н. — Очень хитрая система. Я видел ее, но совершенно не понимал, как она работает. Но как ты применишь этот принцип к осциллографу?

Л. — На рис. 113 я подготовил для тебя блок-схему такого осциллографа.

Предположим, что наблюдаемому периодическому сигналу всегда предшествует сигнал синхронизации. В случае надобности сигнал синхронизации можно получить из самого наблюдаемого сигнала с помощью схемы наподобие триггера Шмитта, а наблюдаемый сигнал задержать с помощью линии задержки.

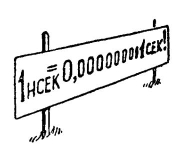


Каждый поступающий импульс синхронизации запускает один очень резко нарастающий пилообразный сигнал. Одновременно импульс синхронизации подается в систему, именуемую сумматором, которая порциями заряжает конденсатор, давая ему порцию энергии при поступлении каждого импульса синхронизации. Пилообразный сигнал с резким нарастанием и сигнал, вырабатываемый сумматором, подаются на схему, называемую компаратором (устройством сравнения). В момент, когда напряжения, подаваемые на два входа этой схемы, оказываются равными, компаратор дает на выходе импульс. Этот импульс используется для управления своеобразным электронным прерывателем, который подключает сигнал к накопительному кон-

ценсатору C только в тот момент, когда получает с компаратора отпирающий импульс[1].

Н. — Все это безумно сложно!

Л. — А я и не говорил, что это просто. Но я считаю, что ты должен знать это устройство, революционизирующее радиоэлектронику высоких частот (где время измеряется наносекундами, т. е. миллиардными долями секунды). Как ты видишь, при поступлении первого сигнала выходное напряжение сумматора почти равно нулю. А это означает, что компаратор даст свой импульс в самом начале подъема крутого пилообразного сигнала, и электронный прерыватель подаст сигнал на конденсатор C в момент, непосредственно следующий за импульсом синхронизации.



В следующий период выходное напряжение сумматора повысится на одну ступеньку, и компаратор немного позже даст свой импульс. Следовательно, на этот раз сигнал позже замкнется на запоминающий конденсатор C, и мы будем анализировать

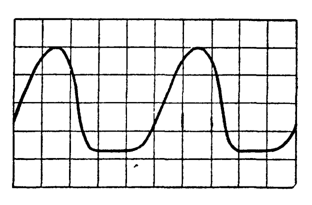


Рис. 114. Кривая, снятая с экрана стробоскопического осциллографа; она позволяет видеть форму колебания, соответствующего частоте 1 *Ггц* (1 000 *Мгц*).

несколько более задержанный относительно импульса синхронизации момент изучаемого сигнала. Каждый период напряжения конденсатора несколько позднее подключается к сигналу. Исходя из предположения, что между периодами конденсатор C не разряжается, мы постепенно соберем на выводах конденсатора C изменение напряжения, соответствующее изменению напряжения значительно замедленного сигнала. Все происходит точно так, как в стробоскопе: в каждый момент «смотрят» науточку более поздний момент сигнала. Прежде чем подать напряжение с выводов конденсатора C на вертикальные отклоняющие пластины осциллографа, это напряжение усиливают. Горизонтальное отклонение осуществляется непосредственно напряжением сумматора. Поэтому, как ты сам можешь понять, световое пятно скачкообразно перемещается на экране электроннолучевой трубки из одной точки в другую. Электронный луч пунктирной линией вычерчивает кривую, характеризующую изменение напряжения сигнала во времени. Такой результат можно получить, используя усилители с очень небольшой полосой пропускания.

Н. — Вот сколько усложнений, чтобы сделать осциллограф! Но я совершенно не вижу, что мы этим выиграли.

Л. — Причина в том, что ты невнимательно смотришь. Взгляни на осциллограмму, изображенную на рис. 114. Она снята с экрана стробоскопического осциллографа. Ты видишь надписи на этом рисунке?

Н. — Да, 0,2 *в/см* по вертикали и 0,2 *нсек/см* по горизонтали.

---

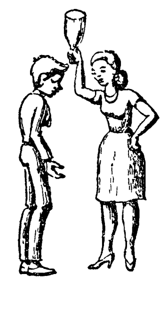
[1] Такая схема часто называется «схемой стробирования». (*Прим. ред.*).

Л. — И ты говоришь это так спокойно, совершенно не задумываясь чему это соответствует. А ты знаешь, Незнайкин, что такое наносекунда?

Н. — Ты сам мне сказал, что это одна миллиардная доля секунды. Вот и все.

Л. — Мне кажется, ты никак не реагируешь. Ты только подумай, что за одну наносекунду свет (который никак не назовешь увальнем) пробегает всего лишь 30 *см.*

Н. — А, теперь я начинаю понимать, что это действительно довольно быстро. Но тогда, если я правильно понял, период несколько деформированной синусоиды укладывается в 5 *см*, иначе говоря, ее период равен одной наносекунде. Да это же 1 000 *Мгц*!



Л. — Я счастлив, что мне удалось дать тебе, так сказать, пощупать собственными руками довольно замечательное устройство.

Н. — Любознайкин, ты сказал мне, что такая кривая получается из мельчайших кусочков, которые располагают один за другим, а здесь я вижу одну сплошную линию.

Л. — Кривая в самом деле состоит из серии точек. Кривую в общей сложности образуют две тысячи точек, они сливаются в сплошную линию, и поэтому ты не можешь различить отдельных точек.

Н. — Просто чудесное устройство. Я немедленно куплю себе стробоскопический осциллограф.

Л. — Я советую тебе несколько повременить, потому что сейчас такой осциллограф стоит в 2—3 раза дороже спортивного автомобиля.

Н. — Пока я довольствуюсь самой маленькой микролитражной и поэтому немного подожду. Но мне кажется, что время уже позднее...

Л. — Я не хотел бы стать причиной твоего неприятного объяснения с Поленькой и поэтому приглашаю тебя завтра к себе, чтобы продолжить нашу беседу.

■

Беседа двенадцатая

Незнайкин не любит математику, и поэтому вполне логично, что его друг объясняет ему, как электронные машины будут производить для него вычисления. Для начала ему предстоит изучить первую операцию — счет. Беседа начинается со счета в двоичной системе, затем переходит на декадные счетчики, считающие в десятичной системе, и в заключение наши друзья говорят о способах визуального отображения результатов счета. Не испытывая больше никаких сомнений, Незнайкин просит объяснить ему даже, что такое «счетчик до предварительно заданного числа».

Электронный счет

Любознайкин — Добрый день, Незнайкин. Сегодня я хочу рассказать тебе кое о чем совершенно новом — о счете.

Незнайкин — А что ты собираешься считать?

Л. — Мы будем считать электрические импульсы. Самое интересное то, что их можно считать очень быстро. Может быть ты уже знаешь способ подсчета электрических импульсов?

Механический счет

Н. — Да, недавно я купил маленький телефонный счетчик[1]. Внимательно изучив его, я убедился, что он относительно прост. В нем имеется электромагнит, который каждый раз, когда в его обмотку посылают ток, притягивает якорь. При отключении тока якорь под воздействием пружины возвращается в исходное положение. На обратном пути якорь толкает собачку, которая на некоторый угол поворачивает зубчатое колесико. Последнее увлекает за собой колесико с цифрами, вращающееся перед маленьким окошком. На этом колесике нанесены все десять цифр; совершив полный оборот, оно поворачивает на одну десятую оборота или на одну цифру следующее аналогичное колесико. Такая же система используется в автомобильном спидометре для подсчета общего пройденного пути.

Л. — Очень хорошо, Незнайкин, ты исключительно верно описал механический счетчик. Такая система удобна, но как ты сам, вероятно, уже заметил, ее возможности с точки зрения скорости счета весьма ограничены.

Н. — Как бы не так! Мне удалось считать до четырех импульсов в 1 *сек.*

Л. — Совсем не плохо для механического счетчика, но нам предстоит рассмотреть схемы, способные считать несколько десятков миллионов импульсов в 1 *сек.* Я полагаю, что твоя

---

[1] Во Франции абонентская плата за пользование телефоном определяется по количеству состоявшихся разговоров, для подсчета которых устанавливают специальные счетчики. (*Прим. перев.*)

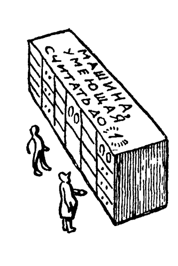
механическая система даже близко не сможет подойти к таким результатам.

Н. — Бедняжка, на это она, конечно, не способна. Я предполагаю, что ты говоришь об электронных системах?

Счет по 2

Л. — Да, и одну из них ты уже знаешь.

Н. — Ну, знаешь! Я даже не представляю, что ты имеешь в виду.



Л. — И тем не менее мы вместе говорили об этом устройстве: о триггере Экклеса-Джордана с двумя устойчивыми состояниями, схему которого я привел на рис. 82.

Н. — Так это простой делитель частоты на 2, и я совсем не понимаю, как он может считать.

Л. — Ну тогда, Незнайкин, предположи, что я систематически привожу этот триггер для начала в какое-нибудь определенное положение (например, транзистор T_1 в состояние насыщения, а транзистор T_2 заперт). В этом случае я легко могу узнать, получил триггер импульс или нет, для чего достаточно посмотреть, остался ли он в первоначальном состоянии или переключился.

Н. — Здесь я с тобой согласиться не могу. Если он получит три импульса, то картина получится точно такая, как при получении одного импульса. А если он получит два импульса, ты сможешь сделать вывод, что он не получил ни одного.

Л. — Совершенно верно, эта схема может считать только до одного. После этого числа она начинает ошибаться.

Н. — Прими мои поздравления. Стоит ли делать столь сложное устройство для того, чтобы считать до единицы? Достижение, прямо скажем, невелико!

Счет по 4

Л. — Предположи, что я беру эту схему и делаю так, чтобы, возвращаясь на нуль (т. е. к состоянию, когда транзистор T_1 отперт, а T_2 заперт), триггер давал отрицательный импульс и направлял его на вход другой схемы, идентичной первой (рис. 115). Рассмотрим состояние, когда оба триггера стоят на

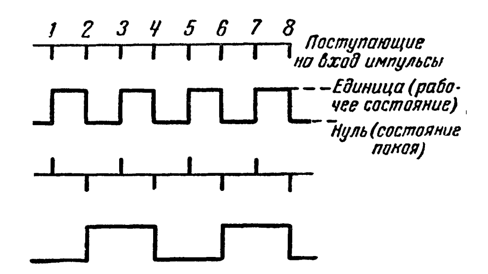


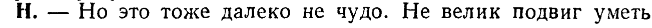
Рис. 115. Поступающие на вход импульсы переключают первый триггер из одного состояния в другое (с единицы на нуль или наоборот) и заставляют его работать с частотой, в 2 раза меньшей. Выходное напряжение этого триггера (используются только отрицательные импульсы) приводит в действие следующий триггер, который работает на частоте в 4 раза ниже частоты входных импульсов.

нуле. При поступлении первого импульса первый триггер переходит в состояние, которое я назвал бы рабочим (T_1 заперт, T_2 в состоянии насыщения), но это не оказывает никакого воздействия на второй триггер. От такого переключения он получит только безразличный для него положительный импульс. При поступлении на вход второго импульса первый триггер возвращается на нуль. Но теперь он пошлет на второй триггер отрицательный импульс и тем самым его опрокинет. Третий импульс вновь переведет первый триггер на единицу, а второй триггер останется в рабочем состоянии. Четвертый импульс вернет первый триггер на нуль, а посланный им отрицательный импульс переведет на нуль и второй триггер. Таким образом наша новая схема может считать от нуля до трех, а дальше начнет давать неверные результаты.

ЧЕТНОЕ

НЕЧЕТНОЕ

Н. — Но это тоже далеко не чудо. Не велик подвиг уметь считать до трех.



Счет до 2^n

Л. — Да, но это быстро станет очень интересным. Мы соберем целую серию триггеров по приведенной на рис. 82 схеме и сделаем так, чтобы, опрокидываясь, один триггер передавал сигнал на вход другого. Например, мы приложим напряжение коллектора транзистора T_1 каждого триггера на дифференцирующую схему (один из вариантов которой приведен на рис. 64).

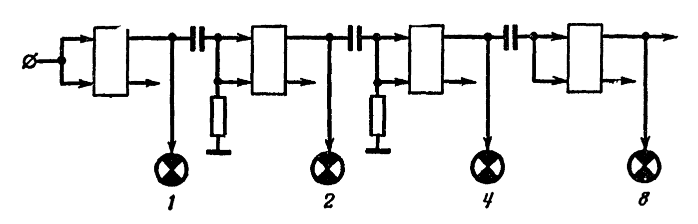
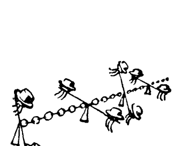


Рис. 116. Двоичный счетчик состоит из цепочки триггеров, где один управляет другим; состояние каждого триггера индицируется лампочкой.

При каждом возвращении на нуль триггер подаст отрицательный импульс на вход следующего и тем самым заставит его опрокинуться (рис. 116).

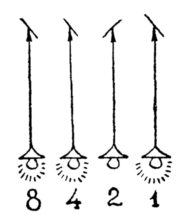
Н. — Я охотно допускаю, что каждый прямоугольник обозначает триггер с двумя устойчивыми состояниями со схемы на рис. 82, но я совершенно не понимаю, откуда у каждого такого триггера взялось по два входа и выхода.



Л. — Двумя входами служат конденсаторы C_3 и C_4 со схемы на рис. 82. Здесь я, как и раньше, подаю сигнал одновременно на оба входа, но так поступают не всегда. Два выхода соединены с коллекторами транзисторов.

Рассмотрим цепочку из таких триггеров. Предположим, что вначале они все стоят на нуле. Как ты видишь, каждый раз при получении нечетного количества импульсов первый триггер станет на единицу, а после прохождения нечетного числа импульсов вернется на нуль. Второй триггер переключится на единицу после второго импульса, останется в этом положении после

третьего и вернется на нуль после четвертого импульса, затем пропустит в этом положении пятый импульс. Продолжая рассматривать поведение цепочки триггеров, ты можешь придти к выводу, что чем дальше в цепочке стоит триггер, тем реже он переключается. Впрочем, в этом нет ничего удивительного, так как каждый из них делит частоту поступающего к нему сигнала на два. Мне достаточно определить положение триггеров, например, с помощью маленькой лампы, загорающейся при переключении триггера на единицу, чтобы узнать, сколько сигналов пришло на вход цепочки. Я напишу *1* под лампой первого триггера, *2* под лампой второго, *4* под лампой третьего, *8* под лампой четвертого, *16*, *32* и *64* соответственно под лампами пятого, шестого и седьмого...

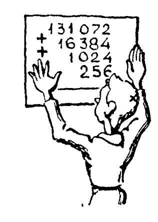


После прохождения некоторого количества импульсов мне останется лишь выписать числа под горящими лампочками и сложить их. Сумма даст мне количество поступивших импульсов. Как ты видишь, прибавляя новый каскад я каждый раз удваиваю максимальное число. Так с помощью цепочки из десяти каскадов я могу считать до 1 024, а при наличии *11*, *12* и *13* каскадов мои возможности считать увеличиваются соответственно до 2 048, 4 096 и 8 192. Ты видишь, что предел растет довольно быстро.

Н. — Согласен, но все же это довольно сложно. А в довершение всего ты не можешь быть уверен, что количество поступивших импульсов не превысило максимального числа, которое твой счетчик способен отобразить. В таком случае ты не будешь знать, насколько можно верить его показаниям.

«Сторожевой триггер»

Л. — Есть способ узнать, превысило ли число поступивших импульсов возможности нашего счетчика. Для этого достаточно после последнего триггера поставить триггер специальной конструкции, который может срабатывать только один раз. Такой триггер, например, можно собрать по схеме, приведенной на рис. 82, убрав из нее конденсатор C_4. Полученное устройство при поступлении первого импульса переключится на единицу, но потом останется в этом положении, сколько бы импульсов не пришло. Такой триггер, установленный после последнего, будет служить там в качестве системы безопасности. Если последний счетный триггер не вернется на нуль, то и триггер безопасности всегда будет стоять на нуле. Следовательно, до тех пор, пока триггер безопасности стоит на нуле, мы можем быть уверены в правильности показаний счетчика. Во всяком случае стараются поставить достаточное количество каскадов, чтобы счетчик всегда мог сосчитать поступающие импульсы без необходимости «повторять цикл», т. е. возвращать на нуль из-за превышения максимального допустимого числа.



Н. — В этих условиях я допускаю, что при достаточном количестве каскадов твой счетчик способен считать до 8 192 или вдвое больше и что поэтому его можно признать взрослым. Но меня огорчает, что для определения количества поступивших импульсов приходится складывать множество чисел, некоторые из которых могут быть относительно сложными. Но это совершенно не означает, что я не вижу, какого прогресса мы достигли по сравнению с механическим счетчиком.

Л. — Но твой механический счетчик проще по устройству, а его показания легче прочитать Но я повторяю, что при удачном выборе первых триггеров в цепочке мы можем считать им-

пульсы, следующие со скоростью нескольких миллионов в 1 *сек* и даже нескольких десятков миллионов в 1 *сек*.

Н. — Об этом я не думал, но тогда потребуется действительно солидное количество каскадов, иначе возможности твоего счетчика быстро окажутся недостаточными.

Л. — С этим доводом нельзя не согласиться, так как способный считать до миллиона счетчик должен иметь 20 каскадов. Но я напоминаю тебе, что эти каскады, особенно работающие в невысоком ритме, относительно просты. Но я полностью согласен с тобой, что такой бинарный счетчик (работающий в бинарной системе счисления, признающей только две цифры — нуль и единицу) не очень удобен в работе. Поэтому разработали более совершенные счетчики, позволяющие считать в нашей привычной десятичной системе.

Счет по 10

Н. — Можешь ли ты описать мне один из них... Я боюсь, как бы он не оказался ужасно сложным.

Л. — Некоторые из этих схем достаточно сложны. Мы рассмотрим только одну так называемую счетную декаду, представляющую собой электронную схему, которая по получении

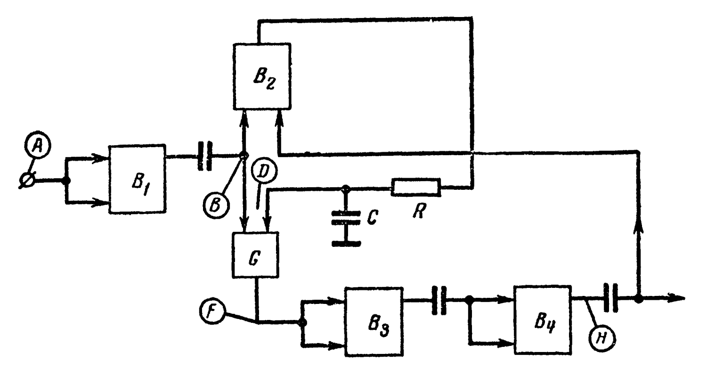
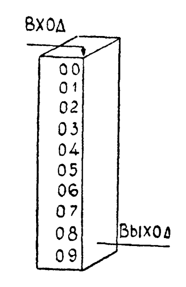


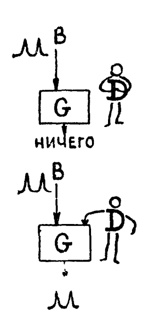
Рис. 117. Блок-схема счетной декады, выпускаемой французской фирмой Rochar. Схема B_1 с двумя устойчивыми состояниями является делителем на 2; устройство, состоящее из трех других триггеров, последовательно проходит пять возможных состояний.

десяти импульсов всегда возвращается в первоначальное состояние. По получении десятого импульса она дает в канал, именуемый выходом, импульс, приводящий в действие следующую декаду.

Я покажу тебе устройство декады, разработанной инженерами фирмы Rochar, блок-схема которой изображена на рис. 117. Как ты видишь, в начале схемы стоит первый триггер B_1 с двумя устойчивыми состояниями, который я вновь изобразил в виде прямоугольника (на этот раз триггер опять собран по схеме на рис. 82).

Н. — Ты опять нарисовал два входа, но это не нужно, потому что ты всегда соединяешь их вместе.



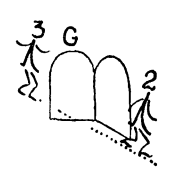


Л. — Нет, не всегда. Я могу подавать на них разные сигналы, например, сигналы одного типа на конденсатор C_3 и другого типа на C_4. По этой причине я и рассматриваю триггер как схему с двумя входами. Когда триггер используют в качестве делителя частоты на 2, входы соединяют вместе и одновременно подают на них отрицательные импульсы. Мы назвали нулевым состоянием (или состоянием покоя) положение, когда транзистор T_1 пропускает ток, а транзистор T_2 заперт. Когда триггер возвращается на нуль, резкое снижение потенциала коллектора транзистора T_1 посылает через дифференцирующую схему (из которой я изобразил здесь только конденсатор) отрицательный импульс. Поэтому, как ты видишь, на каждый второй поступивший на вход импульс в точку B приходит отрицательный импульс.

Н. — Да, и я также вижу, что этот импульс затем идет по двум направлениям: во-первых, на триггер B_2, куда он странно поступает только на один вход, а, во-вторых, на схему, обозначенную на рисунке буквой G, о которой я ровным счетом ничего не могу сказать.

Л. — Попробуем рассуждать по порядку. В самом деле, сигнал в триггер B_2 поступает только на базу его транзистора T_1. От первого импульса, попавшего на его левый вход, триггер опрокинется и с нуля перейдет на единицу (T_1 заперт, T_2 в состоянии насыщения). Последующие отрицательные импульсы, которые могут поступить из точки B, не окажут на него никакого воздействия до тех пор, пока он не будет возвращен на нуль.

Схему, обозначенную на рисунке буквой G, называют ключевой; управляемый напряжением электронный ключ (клапан) не пропускает в точку F импульсы, подаваемые на его левый вход, если напряжение на его входе D равно нулю. Если же на его вход D поступает положительное напряжение, то ключ открывается для прохода импульсов и приходящие на его левый вход импульсы окажутся в точке F.



Н. — Такую схему, вероятно, очень трудно сделать.

Л. — О, нет, обычно достаточно одного диода и одного резистора, но к этому вопросу мы еще вернемся. А пока я покажу тебе, что часть схемы, расположенная после точки B и получающая отрицательные импульсы, может иметь пять различных состояний, через которые она последовательно и проходит.

Первый пришедший в точку B импульс опрокинет триггер B_2; потенциал левого выхода триггера B_2 (коллектор его транзистора T_1) повышается и открывает ключ G...

Н. — Значит, этот первый импульс пройдет через G, и мы встретим его в точке F.

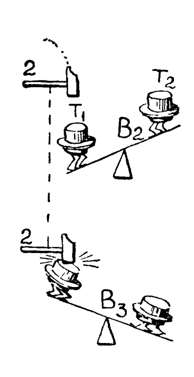
Л. — Нет, Незнайкин, ты кажется забыл о наличии резистора R и конденсатора C. Они несколько задержат повышение потенциала точки D, но этого будет достаточно, чтобы вызвавший опрокидывание триггера B_2 импульс пришел к еще запертому ключу G и не смог через него пройти. А вот второй поступающий в точку B импульс спокойно пройдет через ключ G.

Н. — Но ведь этот импульс вновь воздействует на триггер B_2?

Л. — Он ничего ему не сможет сделать; не забывай, что импульс приходит только на один вход триггера, а когда отрицательный импульс поступит на базу запертого транзистора T_1, он не даст никакого эффекта.

Н. — Правильно, а я об этом забыл. Но если импульс ничего не сделает триггеру B_2, он должно быть что-то сделает триггеру B_3?

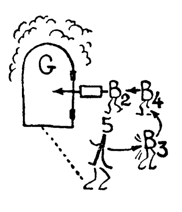
Л. — Ты совершенно прав. Импульс опрокинет триггер B_3, но никак не повлияет на триггер B_4, потому что, переключившись с нуля на единицу, B_3 пошлет на триггер B_4 положительный импульс, на который тот не реагирует. Третий поступивший в точку B импульс пройдет через ключ G (триггер B_2 все еще находится в положении *1* (единицы). Оказавшись в точке F, третий импульс возвращает триггер B_3 в нуль, в результате чего триггер B_3 посылает отрицательный импульс на вход триггера B_4 и опрокидывает его. Поступивший в точку B четвертый импульс проходит через ключ G, достигает точки F и переводит триггер B_3 в положение *1*, что никак не сказывается на состоянии триггера B_4...



Н. — У меня сложилось такое впечатление, что триггеры B_3 и B_4 работают как классический счетчик, умеющий считать до 3. Разве не так?

Л. — Твое впечатление совершенно правильное и обоснованное. А теперь рассмотрим, что произойдет при приходе в точку B пятого импульса. Он пройдет через ключ G, достигнет точки F, переведет триггер B_3 в положение нуля, в результате чего B_3 даст отрицательный импульс, который опрокинет триггер B_4, вернув его в нуль.

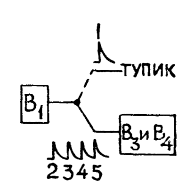
При переходе в нулевое состояние триггер B_4 в свою очередь даст отрицательный импульс на свой выход H, откуда он поступит на правый вход триггера B_2 и переведет его в нуль.



Н. — Но этого не может быть! Как только B_2 вернется на нуль, он запрет ключ G и не пропустит этот пятый импульс.

Л. — Мне кажется, что ты еще раз забыл о наличии резистора R и конденсатора C, которые замедлят передачу импульса с выхода триггера B_2 на ключ G. Но даже и без этих резистора и конденсатора не было бы никакой опасности. Пятый импульс сначала проходит через G, затем переводит B_3 в нуль, что вызывает далее переключение B_4 в нуль, и только после этого порождаемый переключением триггера B_4 отрицательный импульс отправляется на триггер B_2. Благодаря всем этим задержкам пятый импульс свободно успевает пройти через ключ G, который он сам позднее запирает.

Н. — Очень умная система. Если я верно понял, здесь имеется четырехпозиционный счетчик, состоящий из триггеров B_3 и B_4, который может считать от 0 до 3. Один из посланных в счетчик импульсов ловко прячут с помощью ключа G и направляют в триггер B_2, благодаря такому приему система может считать от 0 до 4, т. е. до 5.



Л. — Ты абсолютно прав, Незнайкин, прими мои поздравления. Сегодня ты в прекрасной форме. Теперь ты понимаешь, что вся система делит на 10, потому что устройство состоящее из триггеров B_2, B_3 и B_4 возвращается в исходное положение после каждых пяти импульсов, поступающих в точку B, что соответствует десяти импульсам в точке A.

Индикация цифр

Н. — Я согласен, что твоя схема хорошо считает десятками. Но я не понимаю, как мы зрительно обозначим результат.

Л. — Для этого необходимо с помощью резисторов смешать напряжения с коллекторов четырех триггеров. Подробное описание этих схем покажется очень сложным, но большого интереса не представляет. Запомни только, что легко получить напряжения на десяти независимых проводниках, одно напряжение будет положительным, а остальные отрицательными. Когда вся система стоит на нуле, положительное напряжение

подается на проводник, именуемый «нулем», а все остальные проводники имеют отрицательный потенциал. По мере поступления импульсов в декаду положительное напряжение переносится на проводники, обозначенные цифрами 1, 2 и так далее до 9, затем оно вновь возвращается на проводник с отметкой 0. Эти 10 проводников соединены с базами 10 кремниевых транзисторов, способные выдерживать высокое напряжение. В цепи коллекторов этих 10 транзисторов включены 10 неоновых лампочек, которые могут загораться поочередно при отпирании транзистора, управляющего соответствующей лампой.

Н. — Такая система требует очень много компонентов. Если я правильно понял, только для обозначения одной цифры потребуется выстроить в линию 10 твоих неоновых ламп и рядом с ними написать цифры от 0 до 9. Должно быть что-то более

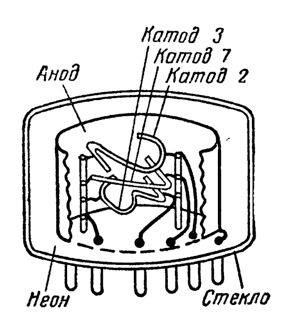


Рис. 118. Цифровая индикаторная лампа. В заполненной неоном колбе находится широкий кольцевой анод (на рисунке он разрезан, чтобы показать конструкцию катодов) и десять катодов из тонкой проволоки, имеющих форму десяти цифр от 0 до 9. Один из катодов всегда подключен, и соответствующая ему цифра светится красным цветом.

совершенное. Однажды у одного из своих приятелей, занимающегося ядерной физикой, я видел в приборе счетчик, в котором наподобие электронной лампы на одном и том же месте появлялись ярко видимые красные цифры. Как может быть устроен такой индикатор?



Л. — Ты видел наиболее современный вариант индикатора — газонаполненную лампу цифровой индикации. Ее часто называют «Никси» (Nixie), хотя это название запатентовано американской фирмой Burroughs для своих ламп такого типа. Индикаторная лампа имеет анод цилиндрической формы и 10 катодов из очень тонкой проволоки, расположенных один за другим; каждый катод имеет форму определенной цифры (рис. 118). К аноду через ограничивающий ток резистор подводится положительное напряжение 250—300 *в*. Катоды соединены с коллекторами 10 кремниевых транзисторов, о которых я тебе уже говорил. Один из этих транзисторов открыт, а остальные заперты. Потенциал катода открытого транзистора падает почти до нуля, и протекающий по лампе ионный ток заставляет газ вокруг катода светиться, благодаря чему становится видна соответствующая цифра.

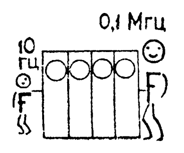
Н. — Очень умно! Но одна вещь кажется мне странной. Ты сказал, что катоды размещаются один за другим. Когда в этой пачке зажжется самый последний катод, мы ничего не увидим из-за расположенных перед ним.

Л. — Вся хитрость устройства этих катодов заключается в том, что они сделаны из очень тонкой проволоки, благодаря чему они практически незаметны на фоне ионизированного неона, светящегося вокруг последнего катода. Если ты внимательно посмотришь с очень близкого расстояния, то может быть различишь тонкие черные нити, пересекающие светящееся изображение цифры, но в обычных условиях нужно обладать

глазами кошки, чтобы их заметить. Разумеется, существуют и другие способы индикации, но описанная газонаполненная лампа имеет тенденцию стать самым распространенным цифровым индикатором.

Н. — Но если подумать, становится просто грустно: на каждую декаду, кроме четырех триггеров и ключа, требуется десять высоковольтных кремниевых транзисторов, индикаторная лампа и резисторы для управления кремниевыми транзисторами. Уж очень много элементов, чтобы сосчитать только до десяти.

Л. — Я согласен с тобой, Незнайкин, но когда мы говорим, что декада считает только до десяти, мы должны одновременно отметить, что она может считать исключительно быстро. Кроме того, не забывай, что две декады позволяют считать до 100, а шести декад достаточно, чтобы считать до миллиона.



Н. — Мне в голову пришла идея...

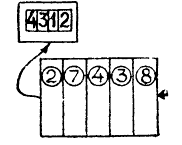
Л. — Это довольно опасно, но тем не менее расскажи.

Н. — Я думаю, что при включении подряд нескольких, например четырех, декад такого типа выходящие с последней декады импульсы имеют значительно меньшую частоту, чем импульсы, подаваемые на первую.

Л. — Я не стал бы говорить «значительно меньшую», а указал бы точно «в десять тысяч раз меньшую».

Н. — Именно это я и хотел сказать. Следовательно, выходящие импульсы имеют довольно низкую частоту. Может быть их можно считать более простым способом и даже механическим счетчиком.

Л. — Именно так и делают. Но обычно перед механическим счетчиком ставят больше четырех декад. Механический счетчик способен срабатывать 4 или 5 раз в 1 *сек.* А так как стоящая первой, т. е. выдерживающая наибольшую нагрузку, декада считает сотни тысяч импульсов в 1 *сек*, перед механическим счетчиком, как ты сам понимаешь, необходимо поставить не менее пяти декад. А при желании повысить скорость счета я поставил бы спереди дополнительную декаду, рассчитанную на очень большие скорости, например до 2—3 млн. импульсов в 1 *сек.*



Если же возникнет надобность еще расширить возможности моего счетного устройства, то я поставлю спереди еще одну декаду, сделанную специально для высоких частот и способную считать импульсы, например, на частоте 50 *Мгц*, таким образом, у меня получилась бы весьма совершенная система.

Н. — Да, я вижу, что механический счетчик может позволить нам сэкономить несколько декад на очень низких частотах. Но все равно меня печалит необходимость делать для счета такие сложные устройства.

Декатрон

Л. — Если ты не очень спешишь, иначе говоря, если у тебя нет необходимости в сверхбыстрых счетных устройствах, можно воспользоваться более простыми системами, обладающими, правда, меньшими возможностями. Довольно интересные результаты можно получить при использовании газонаполненных счетных ламп. Я расскажу тебе об одной из них — она называется декатрон или декадная пересчетная лампа. В заполненной неоном, аргоном или водородом колбе имеется кольцевой анод, обозначенный на рис. 119 буквой *А*. Чтобы не перегружать рисунок, я изобразил лишь часть элементов этой лампы. Под этим кольцом размещаются 10 основных катодов, обозначен-

ных буквой K, которые, как ты видишь, изогнуты в виде крючка в том месте, где они приближаются к аноду.

Эти 10 катодов соединены между собой своим кольцом, замкнутым на корпус. Между каждой парой этих катодов размещается по одному вторичному катоду, которые я нарисовал тонкими линиями и обозначил буквой K'. Все они соединены между собой другим кольцом, выходящим из колбы лампы. Этих катодов тоже 10, и они имеют такую же, как основные катоды, изогнутую форму.

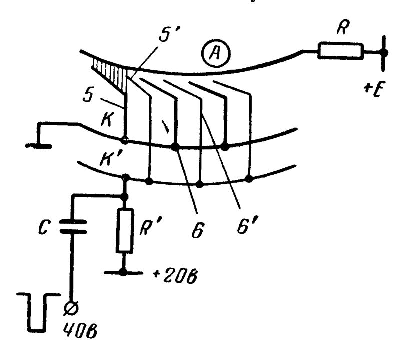


Рис. 119. Газонаполненная счетная лампа типа декатрон. При подаче отрицательного импульса через конденсатор C ионизированная зона перескакивает с одного основного катода на следующий (в изображенном на рисунке случае с *5* на *6*), проходя при этом через расположенный между ними вспомогательный катод (5′).

Н. — Но твой декатрон ужасно сложен! Со своими 20 катодами он, должно быть, стоит безумно дорого!

Л. — Совсем нет. Эти катоды представляют собой всего лишь проволочные крючки простой формы, прикрепленные к кольцу.

Напряжение питания E (300 или 400 *в*) подается на анод через резистор R. Основные катоды K замкнуты на корпус, а все вторичные катоды K' имеют невысокий положительный потенциал. Ионизация начинается на одном из основных катодов K. Предположим, что им окажется катод с номером *5*, как я показал на своем рисунке.

А теперь через конденсатор C подадим отрицательный импульс с амплитудой 40 *в* на вспомогательные катоды K'. Они станут отрицательными относительно катодов K, потому что первоначально они имели потенциал +20 *в*, и конденсатор полностью передает срез импульса. Разность потенциалов между анодом A и катодами K' стала больше разности потенциалов между анодом A и катодами K, и поэтому ионизация стремится теперь установиться между анодом и одним из катодов K'.

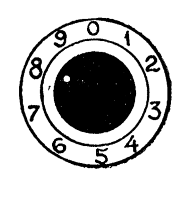


Н. — А какой катод K' «облагодетельствует» ионизация? Ведь ей представляется десять на выбор.

Л. — Нет, имеется только одна возможность: изогнутый кончик вторичного катода *5′* уже находится в зоне ионизации основного катода *5*, поэтому именно этот вторичный катод ионизация и предпочтет всем другим. Тогда ионизированная зона перейдет на вторичный катод *5′*, но долго она там не задержится. По окончании отрицательного импульса, приложенного к катодам K', они вновь обретут свой традиционный потенциал +20 *в*. Ионизация вновь будет стремиться перейти на один из основных катодов K. В наиболее благоприятных условиях для этого оказывается основной катод с номером *6*, так как его изогнутый кончик находится в ионизированной зоне, окружающей вторичный катод *5′*.

Как ты видишь, при каждом импульсе, посланном на вспомогательные катоды K', ионизированная зона перескакивает с одного основного катода на следующий. А так как эта зона

благодаря излучаемому ею свету хорошо видна, достаточно взглянуть на лампу с переднего торца по направлению оси кольцевого анода, чтобы узнать количество полученных ею импульсов. Снаружи вокруг лампы установлено кольцо, на котором по окружности примерно как на циферблате часов нанесены цифры от 0 до 9.



Н. — Твоя система исключительно разумно сделана; лампа не только считает импульсы, но и наглядно обозначает результат счета. Но я плохо представляю, как заставить лампу после каждого десятка импульсов давать импульс для управления следующей лампой.

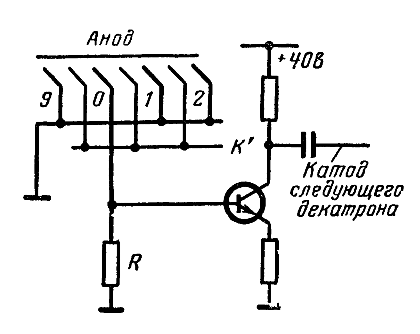


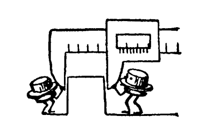
Рис. 120. При получении тока катод «нуль» декатрона отпирает транзистор, который посылает управляющий импульс на следующий декатрон.

Л. — Для этого достаточно с одного из основных катодов *К* сделать отдельный выход. Этот выход соединяется с корпусом через небольшой резистор *R* (рис. 120), на выводах которого появляется небольшое положительное напряжение, когда разряд поступает на выведенный катод. Это положительное напряжение подается на базу транзистора, что порождает на его коллекторе отрицательный импульс, передаваемый следующему декатрону.

Н. — Но эта система мне нравится больше твоих декад. Она значительно проще, и в ней используется только одна лампа.

Ограничения декатрона

Л. — Но не забудь, что для управления вторичными катодами *К'* все же требуется один транзистор-усилитель. Часто для получения хорошо откалиброванного импульса используют даже два транзистора, включенных по схеме с одним устойчивым состоянием. Впрочем, необходимо отметить, что декатрон, выгодно отличающийся от рассмотренных ранее счетчиков определенной простотой, существенно уступает им по быстродействию. Наиболее распространенные модели декатронов работают на частотах до сотни килогерц, что уже очень хорошо. Некоторые специальные модели декатронов, заполненные водородом, способны работать на частотах до 1 *Мгц*. Но водород дает очень слабое свечение и часто приходится пользоваться специальной системой индикации. Эти лампы отличаются небольшими размерами: диаметр около 18 *мм* и длина 40 *мм*. Часто 10 основных катодов *К* снабжаются отдельными выводами для индикации показаний декатрона с помощью транзисторных усилителей и цифровой индикаторной лампы типа «Никси».



Н. — Ты меня серьезно опечалил — только что рассказал о таком простом устройстве и сразу же ввел бездну усложнений.

Л. — Мы должны признать, Незнайкин, что очень большое количество методов построения счетных декад доказывает, что безупречного решения пока еще не нашли.

Попутно хочу сказать тебе о существовании других типов декатронов, которые были созданы раньше уже описанного мною. В одной из таких ламп катоды представляют собой маленькие прямые стерженьки; в лампе имеется не один, а два ряда вторичных катодов K' и K'' (рис. 121). На первый ряд катодов подаются импульсы с крутым фронтом и пологим

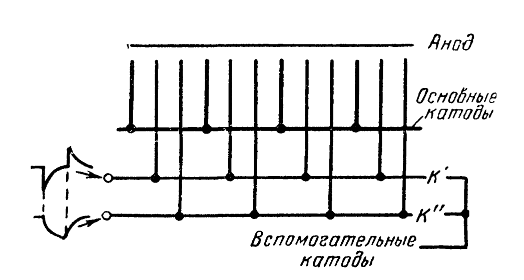
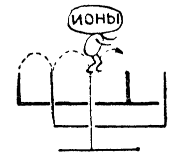


Рис. 121. В декатроне с двумя рядами вспомогательных катодов направление движения ионизированной зоны по кругу задается сигналами, приложенными к этим катодам: на катоды K' подаются прямоугольные сигналы, пропущенные через дифференцирующую схему, а на катоды K'' — прямоугольные сигналы, пропущенные через интегрирующую схему.

срезом, а на второй ряд — импульсы с пологим передним фронтом и еще более пологим срезом. Таким образом удается заставлять ионизированную зону перескакивать с одного основного катода на следующий, проходя при этом через расположенные между ними два вспомогательных катода. Эта система кажется более сложной, но она обладает одним ценным свойством: меняя направление включения двух рядов вспомогательных катодов, можно заставить лампу считать в обычном или в обратном порядке.

Н. — Мне кажется, что это скорее неудобство, чем ценное свойство. Меня с детства приучили считать, прибавляя по единице к уже имеющемуся числу: 1, 2, 3, 4 и т. д.



Л. — Да, это и называют счетом. Но в некоторых случаях полезно иметь устройство, способное «считать назад». С помощью такого способа можно, например, производить вычитание.

Первую партию импульсов счетчик считает, как обычно, а вторую партию обратным счетом, и после этой операции счетчик покажет разность.

Декатрон с двумя рядами вторичных катодов, годится для решения такой задачи, тогда как более простой по конструкции декатрон, изображенный на рис. 119, может чередовать свои показания только в одном направлении.

Н. — Ну, а теперь ты описал все методы счета?

Электроннолучевая трубка с ламинарным лучом

Л. — О, далеко нет! Сейчас я, не вдаваясь в подробности, так как это увело бы нас слишком далеко, кратко расскажу еще о нескольких устройствах. Прежде всего следует сказать об электроннолучевой трубке с ламинарным (слоистым) лучом. Это электроннолучевая трубка особой конструкции, в которой подвергающийся воздействию отклоняющих пластин электронный луч попадает на экран, позволяющий определить место попадания луча. Этот луч проходит через маску с отверстиями (рис. 122) таким образом, что ток луча изменяется в зависимо-

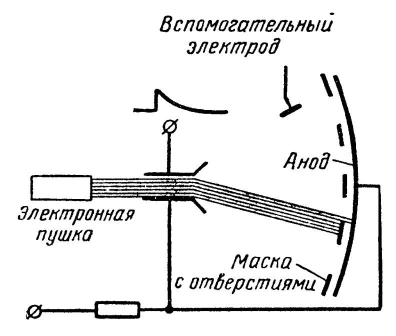
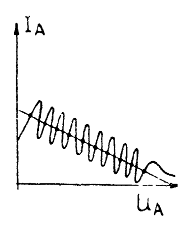


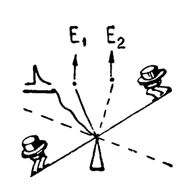
Рис. 122. В электроннолучевой трубке с ламинарным лучом электронный луч по пути к аноду проходит через маску с отверстиями. Анод соединен с отклоняющей пластиной, что придает характеристике анодного тока в зависимости от анодного напряжения форму ломаной линии, что при питании анода через соответствующий резистор позволяет получить для электронного луча десять устойчивых положений. Воздействуя на другую отклоняющую пластину сигналами с крутым фронтом и пологим срезом, можно заставить луч переходить с одного устойчивого положения на следующее.



сти от положения луча по довольно сложному закону, позволяющему с помощью простого резистора, включенного последовательно с анодом, получить 10 устойчивых положений для луча. При подаче импульсов с крутым фронтом и пологим срезом луч перескакивает с одного положения на следующее. Когда луч перескакивает в десятое устойчивое положение, часть его электронов попадает на небольшой вспомогательный электрод, который подает импульс на следующую счетную трубку и возвращает луч первой счетной трубки на нуль. Эта система без особых трудностей может работать на частотах до 30 *кгц*. С помощью специальных схем удается повысить рабочую частоту трубки до 1 *Мгц*. Эти трубки невелики по размерам. Наиболее распространенная трубка такого типа EIT имеет диаметр 35 *мм* и высоту 65 *мм*. Такие трубки дают интересные и экономичные решения, но я должен признать, что используются они все меньше и меньше.

Н. — Досадно. Ведь это чисто электронное устройство элегантнее систем с ионизированным газом.

Л. — Имеются также очень интересные газоразрядные лампы, в частности тиратроны с холодным катодом. Это небольшие неоновые лампы, снабженные специальным поджигающим



электродом (рис. 123). На этих лампах можно собрать схемы с десятью состояниями равновесия (на каждую такую схему требуется 10 ламп). Одно из ценных качеств этих схем заключается в том, что они сами показывают свое состояние: одна из десяти ламп находится в ионизированном состоянии и светится красным цветом. Эта система позволяет считать импульсы с частотой не выше нескольких килогерц, но она отличается простотой и используется в некоторых типах радиоэлектронной аппаратуры промышленного назначения.

Я назову тебе также трохотрон, в котором используется магнитное поле, создаваемое магнитом, расположенным вокруг

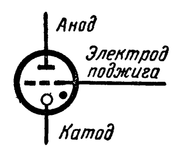


Рис. 123. В тиратроне с холодным катодом имеется электрод поджига (пусковой электрод); подача на этот электрод очень небольшого тока может вызвать появление разряда между катодом и анодом.

самой трубки. Это довольно сложное для описания устройство способно работать на частотах до 1 *Мгц*.

Из всего рассказанного я советую тебе получше запомнить, что при создании счетных устройств специалисты все больше ориентируются на использование счетных декад на транзисторах с индикацией результата с помощью газоразрядных цифровых индикаторных ламп.

Кольцо Реженера

Н. — И все счетные декады на транзисторах собираются по схеме, приведенной на рис. 117?

Л. — О нет, далеко не все. Существуют, вероятно, сотни различных схем счетных декад. Я совершенно не намерен перечислять тебе все эти схемы, а лишь кратко, не вдаваясь в подробности, расскажу о довольно остроумной системе, получившей название кольца Реженера, в которой используются пять триггеров, аналогичных изображенному на рис. 82. Каждый триггер своим выходным напряжением открывает или запирает ключи, направляющие импульсы на тот или другой вход следующего триггера (рис. 124). Триггер *1* включен так, что каждый импульс, посылаемый на управляемый им ключ, стремится переключить триггер *2* в такое же положение, в каком находится триггер *1*. Точно так же устроена связь между триггерами *2* и *3*, между *3* и *4* и между *4* и *5*.

А вот триггер *5* соединен с триггером *1* (вернее, с ключами, управляющими входами триггера *1*) таким образом, что при поступлении импульса триггер *5* стремится переключить триггер *1* в состояние, противоположное тому, в котором находится триггер *5*...

Н. — Твоя система просто немыслимой сложности!

Л. — Согласен, система в самом деле довольно сложная, но очень остроумная. Первоначально все триггеры стоят на нуле. Затем на все ключи посылается импульс. Так как триггер *5* стоит на нуле, он так направляет этот импульс в ключи, управляющие триггером *1*, что последний переключается в положение *1* (единица). Второй импульс, не оказывая воздействия на триггер *1*, находящийся в положении *1*, переключает триггер *2* в положение *1*. После пятого импульса все триггеры оказываются в положении *1*, При шестом импульсе триггер *5* пере-

ключает триггер *1* на нуль. Седьмой импульс вернет на нуль триггер *2*, после десятого на нуль встанет и триггер *5*. Как ты видишь, система нормально считает до 10.

Н. — Очень занятно. Чередование состояний твоих пяти триггеров мне что-то напоминает, но я никак не могу вспомнить, что именно... Ах! Так ведь это похоже на обозначение различных цифр в азбуке Морзе. Там тоже используется пять знаков с постепенным увеличением числа точек: цифре 1 соответствует одна точка (точка и четыре тире), цифре 2 соответствуют две точки (две точки и три тире), а цифре 5 — пять точек. После этого увеличивается количество тире от одного, обозначающего цифру 6 (тире и четыре точки), до четырех, обозначающих цифру 9 (четыре тире и одна точка).

Л. — Признаюсь, что я никогда об этом не думал, но твое сравнение очень верное. По крайней мере, оно показывает, что ты правильно понял чередование состояний триггеров.

Различных счетных декад имеется такое великое множество, что я считаю нецелесообразным даже начинать их описание. Каждая фирма желает непременно иметь свою и, к несчастью, совершенного решения до сих пор нет. Но как бы то ни было, а теперь мы располагаем прекрасными средствами считать импульсы на очень высоких частотах (я слышал даже о счетных устройствах, работающих на частотах до 200 или 300 *Мгц*).

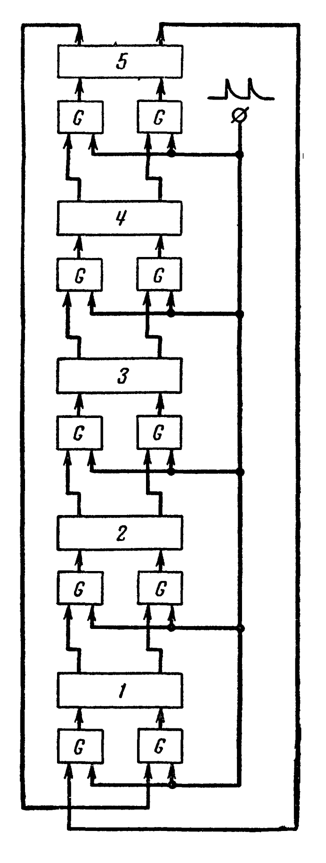


Рис. 124. Устройство «кольца Реженера», позволяющего считать до 10. В устройстве имеется пять триггеров с двумя устойчивыми состояниями и десять ключей (*G*), направляющих пусковые импульсы по правильному адресу.

Применение быстродействующих счетных устройств

Н. — Позволь мне задать тебе один вопрос — для чего нужно считать так быстро?

Л. — Быстродействующее счетное устройство может быть полезно во многих случаях. Прежде всего оно позволяет с высокой точностью измерять частоту. Для этого сигнал ровно на

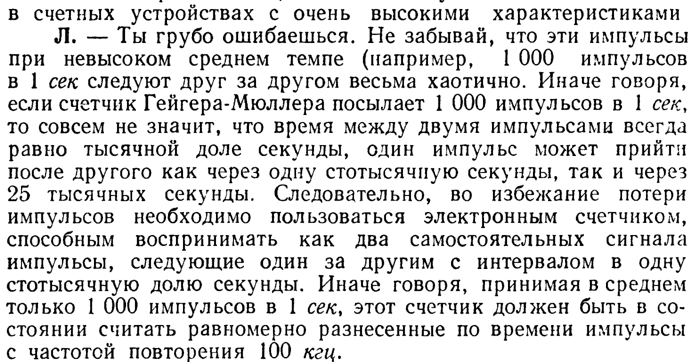


одну секунду подключают к счетному устройству и счетчик показывает количество периодов в секунду.

Затем счетное устройство можно использовать для измерения времени. Представь себе, что на счетчик подают импульсы с частотой повторения 10 *Мгц*. Зная количество принятых счетчиком импульсов, можно с точностью до десятой доли микросекунды подсчитать время, разделяющее первый и последний импульсы. Таким методом, например, можно очень легко и исключительно точно измерить скорость движения пули, которая последовательно перекрывает два луча света, направленные на два фотоэлемента.

Можно сказать еще об одном виде использования счетного устройства. Предположим, что мы послали на счетчик 23 473 импульса, а затем, не сбросив его на нуль, послали еще 118 277 импульсов. Счетчик покажет число 141 750, представляющее, как ты видишь, сумму двух названных чисел. При высокой скорости счета эта весьма примитивная по устройству система позволяет быстро производить сложение больших чисел.

И наконец, счетные устройства широко используются в ядерной физике. Как ты помнишь, счетчики частиц, в частности счетчики Гейгера-Мюллера, выдают импульсы, средний темп которых характеризует активность источника ядерного излучения.



Н. — Я предполагаю, что в этом случае нет необходимости в счетных устройствах с очень высокими характеристиками



Л. — Ты грубо ошибаешься. Не забывай, что эти импульсы при невысоком среднем темпе (например, 1 000 импульсов в 1 *сек* следуют друг за другом весьма хаотично. Иначе говоря, если счетчик Гейгера-Мюллера посылает 1 000 импульсов в 1 *сек*, то совсем не значит, что время между двумя импульсами всегда равно тысячной доле секунды, один импульс может прийти после другого как через одну стотысячную секунды, так и через 25 тысячных секунды. Следовательно, во избежание потери импульсов необходимо пользоваться электронным счетчиком, способным воспринимать как два самостоятельных сигнала импульсы, следующие один за другим с интервалом в одну стотысячную долю секунды. Иначе говоря, принимая в среднем только 1 000 импульсов в 1 *сек*, этот счетчик должен быть в состоянии считать равномерно разнесенные по времени импульсы с частотой повторения 100 *кгц*.

Н. — Это ужасно! Значит вторая декада должна быть способна считать 10 000 импульсов в секунду. третья 1 000 импульсов в секунду!?

Л. — Совсем нет. Если интервал между двумя импульсами может изменяться в чрезвычайно широких пределах, время, занимаемое десятью импульсами, подвержено значительно меньшим изменениям. В среднем оно равно 0,01 *сек* и очень редко его изменения превышают ± 50 %. Поэтому после двух декад импульсы будут идти почти равномерно.

На практике для принятия каждой сотни импульсов требуется почти одинаковое время, а именно 0,1 *сек*, если средний темп составляет 1 000 импульсов в 1 *сек*. Иначе говоря, только первая декада должна обладать рабочей частотой намного выше теоретически необходимой, вторая должна иметь небольшой запас по быстродействию, а третья уже считает импульсы, следующие с почти одинаковыми интервалами.

Н. — Это мне больше нравится. Поэтому после трех или четырех декад мы можем воспользоваться добрыми механическими счетчиками и с их помощью считать десятки тысяч, сотни тысяч и цифры еще более высокого ранга.

Но я хотел бы задать тебе еще один вопрос. Мне говорили о системах электронных счетчиков, на которых до включения набирается нужное число, и затем, когда счетчик дойдет до этого числа, он дает сигнал. Как устроена такая система?

Счетчики до заданного числа

Л. — Интересующая тебя система называется счетчиком до заданного числа. Сделать его очень легко; нужны обычные счетные декады с индексацией показаний на лампах «Никси». С помощью нескольких десятипозиционных переключателей (число переключателей равно числу декад) включают один из электродов лампы «Никси», показывающей единицы, на первый канал, один из электродов лампы «Никси», показывающей десятки, на второй канал и т. д. Предположим, что с помощью этих коммутаторов мы подключили к соответствующим каналам цифру 7 декады единиц, цифру 2 декады десятков и цифру 4 декады сотен. Мы можем сделать электронную схему, которая даст импульс, когда напряжение на всех трех переключателях станет равно нулю, т. е. когда одновременно зажгутся цифра 7 в окошке единиц, цифра 2 в окошке десятков и цифра 4 в окошке сотен. Иначе говоря, счетчик дает сигнал только тогда, когда получит 427 импульсов. Таким образом делают счетчики до заданного числа.

А теперь, когда ты познакомился с основными принципами устройства счетчиков, мы вместе посмотрим, как эти познания используются для создания больших цифровых электронных вычислительных машин...

Н. — Сегодня ты на меня не рассчитывай. Я неправильно оценил возможности своего мозга и теперь рискую допустить просчеты, которые могут вызвать у тебя недовольство...

■

Беседа тринадцатая

Электронные вычислительные машины имеют явно выраженный вкус к двоичной системе счисления, и наш молодой друг вынужден обучиться этой странной арифметической системе, признающей лишь нуль и единицу. Он быстро входит во вкус, что побуждает Любознайкина рассказать ему о логических схемах, которые манипулируют только нулями, единицами и их сочетаниями. Незнайкин без особого труда осваивает сдвигающий регистр — главный элемент электронных вычислительных машин. Однако этот пригодный для всех видов работы инструмент кажется несколько медлительным для выполнения сложений.

Логические схемы и электронная вычислительная техника

Любознайкин — Скажи мне, Незнайкин, чувствуешь ли ты сегодня себя в хорошей форме?

Незнайкин — Да, спасибо. Но почему ты спрашиваешь об этом? Уж не собираешься ли ты подвергнуть меня каким-нибудь ужасным испытаниям?

Л. — Для начала я научу тебя считать... по двоичной системе счисления.

Н. — А я полагал, что прошлый раз мы рассмотрели все связанные со счетом вопросы.

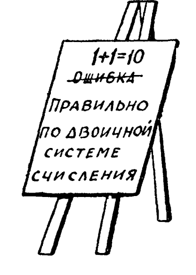
Л. — Тогда мы ознакомились с электронными решениями, а теперь нам предстоит заняться арифметикой.

Н. — Уф!

Л. — Не беспокойся, ты увидишь, что это очень просто. Знаешь ли ты точно, что означает число 385?

Н. — Разумеется, 385 показывает, что число состоит из трех сотен, восьми десятков и пяти единиц.

Л. — Совершенно верно. Мы пользуемся десятичной системой счисления и поэтому можем сказать, что названное число представляет собой следующее выражение: трижды взятый квадрат основания (10^2) плюс 8 раз взятое основание в степени 1 (10^1), плюс пять единиц (10^0), т. е. $385 = 3 \cdot 10^2 + 8 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0$. А теперь представь себе, что в качестве основания для счисления мы вместо 10 возьмем 2. Тогда достаточно пользоваться только двумя цифрами: 0 и 1. Как в этих условиях ты обозначишь количество, которое в десятичной системе счисления обозначается цифрой 2?



Н. — Я совсем не вижу выхода — ведь я могу пользоваться только цифрами 1 и 0.

Л. — И тем не менее это очень просто. Мы запишем это число в виде 1, после которой следует 0. В самом деле, наше число равно основанию 2 в степени 1 плюс нуль единиц. Поэтому его следует записать, как 1, после которой следует нуль.

Н. — Как же так! Ты написал 10 и говоришь, что это 2!

Л. — Я не написал 10, я написал 1 (единицу), после которой следует нуль. Теперь, когда мы отказались от десятичной арифметики и перешли на двоичную, это число уже не означает десять и читать его нужно не как десять, а как «один, нуль».

А как в двоичной системе ты запишешь число, которое в десятичной системе обозначается цифрой 3?

Н. — Я несколько неуверен, но все же попробую. Раз это число представляет собой один раз взятое основание 2 в степени 1 плюс единица, то мне представляется, что его нужно записать в виде двух единиц, стоящих одна за другой.

Л. — Ты совершенно прав. А как записать число 4?

Н. — Не представляю.

Л. — И тем не менее это просто; число 4 не что иное как основание в квадрате. Поэтому это число нужно записать в виде 1, после которой следуют два нуля, чтобы показать, что оно представляет собой один раз взятое основание в квадрате, плюс нуль оснований в степени 1, плюс нуль единиц, т. е. $4 = 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$.

Н. — Твоя двоичная арифметика не представляется мне выдающимся достижением. Нужно целых три цифры, чтобы написать число 4... Результат скорее стоит назвать плачевным.

Преобразования и арифметические действия с двоичными числами

Л. — Не торопись с выводами, дорогой Незнайкин. Несомненно в двоичной системе счисления требуется большее, чем в привычной нам десятичной, количество цифр. В среднем для написания одного и того же числа нужно в 3 раза больше цифр. Но в двоичных числах используются лишь нули и единицы, что значительно упрощает действия с этими числами.

Как ты, например, переведешь на десятичный язык написанное мною по двоичной системе число 1 101 101?[1]

Н. — Для начала я постараюсь не попасть в поставленную тобой ловушку и не скажу, что это один миллион сто одна тысяча сто один. А теперь я начну справа, полагая, что так легче справиться с поставленной задачей. Написанное число, как мы видим, содержит единицу, но оно не содержит основания, потому что его вторая справа цифра нуль; в то же время число содержит основание в квадрате, т. е. 4, и основание в кубе, потому что и третья и четвертая справа цифры — единицы. Затем можно сказать, что число не содержит основания в четвертой степени (это выражение равно 16), но содержит основание в пятой степени (т. е. 32) и основание в шестой степени (т. е. 64). Следовательно, написанное тобою число равно сумме названных чисел, а именно 64, 32, 8, 4 и 1; и на десятичном языке его следует назвать 109.

Л. — Превосходно, Незнайкин, ты прекрасно преобразовал это число. А сможешь ли ты теперь сделать сложение по правилам двоичной арифметики?

Н. — Вероятно, это довольно сложно, но я тем не менее готов попробовать.

Л. — Хорошо, вот тебе числа для сложения

$$
\begin{array}{r}
h\,g\,f\,e\,d\,c\,b\,a \\
+\begin{array}{r} 1\,1\,0\,1\,1\,0\,1 \\ 1\,1\,0\,1\,0\,0\,0 \end{array}
\end{array}
$$

---

[1] Иногда для исключения недоразумений указывают, в какой системе записано число, например: $(1101101)_2$ — число в двоичной системе, $(1101101)_{10} = 1101101$ — число в десятичной системе — один миллион сто одна тысяча сто один. (*Прим. перев.*)

Для облегчения твоей работы я над каждой колонкой расположил маленькие буковки: *a* обозначает единицы, *b* — двойки, *c* — четверки, *d* — восьмерки, *e* — шестнадцатки (прости мне этот неологизм, несколько напоминающий десятки), *f* — тридцать-двойки, *g* — шестьдесят-четверки и *h* — сто-двадцать-восьмерки. Теперь можно начинать. [1]

Н. — Возьмусь за дело. Предполагаю, что здесь поступают, как в десятичной арифметике. Не так ли?

Л. — Совершенно верно, только в двоичной арифметике элементарное сложение цифр производится по другим правилам.

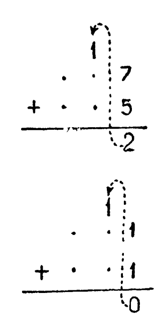
Н. — Так, смело вперед. В колонке единиц, обозначенной буквой *a*, мы имеем 1 вверху и нуль внизу. Я естественно предполагаю, что нуль плюс 1 дает 1 и записываю полученный результат под чертой. Правильно?

Л. — Очень хорошо, но сознайся, что этот случай был не очень сложным.

Н. — Охотно признаю, а теперь перейдем к обозначенной буквой *b* колонке двоек. Это сложение меня несколько смущает; в обоих числах здесь стоят нули.

Л. — Но это самый классический случай, он настолько прост, что проще не бывает. Какой бы арифметикой мы ни занимались, для меня нуль плюс нуль всегда дает нуль.

Н. — Очень логично, об этом следовало бы подумать. Итак, в сумме на месте двоек я записываю нуль. Переходим к четверкам, обозначенным буквой *c*. Здесь тоже нет ничего трудного: 1 вверху и нуль внизу дают в сумме 1, что и записываю под чертой. С восьмерками дело обстоит чуточку посложнее; вверху у нас 1 и внизу тоже 1, их сумма 2, а у меня нет цифры 2, чтобы записать полученный результат.



Л. — Действительно у тебя нет цифры 2, но ты можешь записать число 2 в двоичной системе в виде 1, за которой следует нуль. Иначе говоря, ты оказался в таком же положении, как при сложении по правилам десятичной арифметики, когда полученный результат превышает 10. Как ты обычно поступаешь в таком случае?

Н. — В таком случае я просто-напросто записываю цифру единиц и запоминаю цифру десятков.

Л. — Хорошо, так запиши цифру единиц, т. е. нуль в колонку *d* и запомни цифру двоек, в нашем случае 1, которую ты потом прибавишь к сумме, полученной в колонке *e*.

Н. — Продолжим; в колонке *e* все обходится без каких бы то ни было трудностей; нуль в одном слагаемом, нуль в другом слагаемом да запомненная 1 дают в сумме только 1. Этот результат я и вписываю под чертой в колонке *e*. В колонке *f* мы сталкиваемся с уже знакомым положением: 1 + 1 дают в сумме 2 — я записываю нуль и запоминаю 1, которую предстоит прибавить к результату, полученному в колонке *g*.

А вот с колонкой *g* справиться значительно труднее, потому что там мы имеем три слагаемых и каждое из них равно 1.

Л. — Но тебе надлежит применить этот же самый принцип. Сложение трех чисел по 1 в сумме дают 3, а это число в дво-

[1] Двоичная и десятичная системы счисления относятся к так называемым позиционным системам счисления, в которых цифры имеют различные значения в зависимости от того, на каком месте в записи числа они стоят. Существуют непозиционные системы счисления, как, например, римские цифры. В этой системе смысл каждого символа не зависит от его местоположения в записи числа: $L = (50)_{10}$, $C = (100)_{10}$, $V = (5)_{10}$, LXXVI = 76. (*Прим. ред.*).

ичной системе счисления записывается как одна двойка и одна единица, т. е. 1, после которой следует 1. Следовательно, запишешь 1 в колонку *g* и запомнишь 1.

Н. — Правильно, я сам должен был до этого додуматься; перейдем же к последней нашей колонке *h* — здесь нет ничего кроме 1, которую я запомнил, и мне остается лишь записать ее под чертой как полученный результат. Теперь я понял, почему ты предусмотрел эту колонку и обозначил очередной буквой, хотя ни в одном из наших слагаемых в этом разряде цифр не было.

Логические схемы

Л. — Я полагаю, что ты уже располагаешь достаточными знаниями, чтобы с помощью логических рассуждений произвести любые операции с двоичными числами. А теперь давай посмотрим, какими электронными средствами можно осуществить такие операции.

Я начну с рассказа о логических схемах.

Н. — Как! Разве те схемы, о которых ты до сих пор мне рассказывал, не признавали логики?

Л. — Дорогой Незнайкин, оставь, пожалуйста, игру слов для других обстоятельств. Логическими схемами называют схемы, способные выполнять некоторые логические операции, описываемые алгеброй логики и тесно связанные с двоичной арифметикой. Рассматривая эти схемы, мы будем интересоваться лишь наличием или отсутствием напряжения. Отсутствие напряжения мы назовем нулем, а наличие некоторого положительного напряжения назовем 1. Иначе говоря, все, что не 1 будет нуль, а все, что не нуль, будет 1.

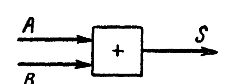


Рис. 125. Условное обозначение логической схемы ИЛИ, которая выдает напряжение на выходе, когда напряжение имеется на одном или на другом входе (или на обоих входах одновременно).

Н. — Все ясно, и я чувствую себя совершенно спокойно, если только дальше не появится что-то более сложное.

Л. — Не очень-то доверяй своему впечатлению, Незнайкин, именно за этой кажущейся простотой иногда скрываются трудности. Но как бы то ни было, ты увидишь, что это не уведет нас слишком далеко.

Начнем со схемы ИЛИ, которую в очень упрощенном виде я изобразил на рис. 125. Пусть тебя не беспокоит знак +; он заимствован из специальной системы обозначений, в которую я предпочитаю тебя не посвящать Схема предназначена для выдачи напряжения на выходе *S*, когда напряжение имеется на ее входе *A* или на входе *B* или одновременно на обоих входах. Нечто аналогичное можно получить, если предположить, что напряжения *A* и *B* воздействуют на катушки двух реле, нормально разомкнутые контакты которых включены параллельно.

Н. — В твоей идее схемы ИЛИ меня несколько беспокоит отсутствие какой бы то ни было разницы между случаями, когда напряжение подается на один из двух входов и когда оно подается на оба сразу.

Л. — К этой идее необходимо привыкнуть. Представь себе, например, что мы установили электрический звонок и подключили к нему параллельно два включателя — кнопки, установленные в разных местах. Звонок зазвонит при нажатии как на одну, так и на другую кнопку. Он также зазвонит (но не вдвое громче), если я нажму одновременно на обе кнопки.

Н. — Согласен, но тогда твое определение ИЛИ следовало бы заменить каким-либо специальным словом.

Л. — Отчасти верно. Мы так привыкли придавать слову «или» исключающий характер, что сами мы говорим о каком-то человеке, будто он большой или маленький, то разумеется, не имеем в виду, что он может быть одновременно и большим и маленьким. Но слово «или» употребляется и без исключающего смысла. Когда мы, например, говорим, что транзистор испорчен или неправильно используется, вполне возможно одновременно и то и другое и в этом случае слово «или» не носит идеи исключения.

Перейдем теперь к схеме И. Условное обозначение этой схемы я воспроизвел на рис. 126. Поставленный на схеме значок × заимствован из системы обозначений булевой алгебры, ознакомление с которой увело бы нас очень далеко.

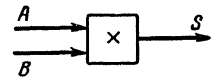


Рис. 126. Условное обозначение логической схемы И, которая выдает напряжение на выходе, когда напряжение имеется одновременно на одном и на другом входах.

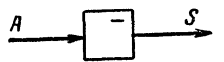


Рис. 127. Условное обозначение схемы дополнения, которая выдает напряжение на выходе, когда на входе напряжения нет и наоборот.

Эта схема дает напряжение на выходе, когда напряжение одновременно подается на ее вход A и на вход B. Пример такой схемы мы можем получить: представь себе, что напряжения A и B приводят в действие два реле, нормально разомкнутые контакты которых включены последовательно.

А теперь я познакомлю тебя с третьей логической схемой, так называемой схемой дополнения. Ее условное обозначение приведено на рис. 127. Эта схема дает напряжение на выходе, когда на ее входе нет напряжения, и не дает выходного напряжения, когда на ее вход подается напряжение. Такую схему можно получить, если входное напряжение A подавать на катушку реле, нормально замкнутый контакт которого дает на выходе схемы положительное напряжение.

Логические схемы без реле

Н. — Твои схемы представляются мне достаточно простыми, но я сожалею о наличии в них реле. Должно быть, имеется возможность заменить их какими-нибудь элементами, способными работать быстрее.

Л. — Ты прав. Описанные мной схемы, использующие реле, предназначены только для того, чтобы ты хорошо понял принцип работы этих логических схем. Если тебе нужен пример, то логическую схему (рис. 127) можно с успехом реализовать с помощью электронной схемы, изображенной на рис. 128.

Как ты видишь, при подаче в точку A потенциала $+E$ (который рассматривается как наличие напряжения) транзистор запирается и выходное напряжение S становится равным нулю.

в том случае, когда *А* замкнута на корпус (отсутствие напря-
кения на входе), по включенному в цепь базы резистору опротивлением 10 *ком* протекает ток. Если коэффициент усиле-
ия этого транзистора по току превышает 10 а это вполне нормально), то транзистор на-
одится в режиме насыщения, и протекаю-
ций ток создаст на его коллекторе (т. е. на ыходе *S*) потенциал, близкий к $+E$. Име-
тся также возможность сделать на тран-
исторах довольно простые схемы И и ІЛИ.

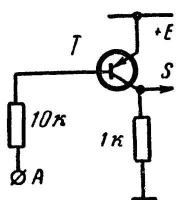


Рис. 128. Схема дополнения на одном транзисторе.

Н. — Все это в самом деле довольно росто, но я не очень хорошо вижу, что ты танешь делать со своими логическими схе-
ами. Возможности этих схем представля-
отся мне очень ограниченными.

Объединения логических схем

Л. — Не беспокойся. Возможности этих схем становятся большими, стоит только собрать их в достаточном количестве. Чтобы привести пример, построим схему, которая позволит нам складывать двоичные числа. Как ты сам убедился, при сложении двоичных чисел возможны три результата:

нуль, если обе цифры равны нулю;

единица, если одна из слагаемых цифр единица;

нуль (и перенос единицы в следующий разряд), если обе слагаемые цифры единицы.

Рис. 129. Объединение логических схем, носящее название схемы «исключающее ИЛИ» или полусумматора. Устройство дает напряжение на выходе, когда имеется напряжение на входе *A* или на входе *B*, но не одновременно на обоих входах.

Мы попробуем так объединить схемы, чтобы полученное устройство давало выходное напряжение при приложении напряжения на один или на другой вход, но не давало при одновременной подаче напряжения на оба входа.

Н. — В этом случае схема ИЛИ нас не устроит.

Л. — Правильно, одной этой схемы будет недостаточно. Но посмотри на схему, изображенную на рис. 129. Напряжения *A* и *B* одновременно подаются на схему ИЛИ *1* и на схему И *2*. Как ты видишь, на выходе схемы И я поместил схему дополнения (*3*).

ничто+ничто=?



На выходе этой схемы дополнения я получу единицу. Исключение будет лишь в том случае, если на входе всего устройства одновременно присутствуют напряжения *A* и *B*, ибо только при этом условии схема И *2* дает выходное напряжение.

Н. — До сих пор я все понял без труда.

Л. — Остальное не более сложно. На выходе схемы ИЛИ *1* напряжение будет, когда оно имеется на входе *A* или на входе *B* или одновременно на обоих. А теперь посмотри, как ведет себя схема И *4*. Эта схема не получит напряжения на свой нижний вход только в том случае, когда напряжение подается одновре-

менно на входы A и B всего устройства. Во всех трех других случаях (напряжение в точках A и B равны нулю, напряжение в A равно нулю и присутствует в точке B, напряжение присутствует в A и равно нулю в точке B) на нижний вход схемы И 4 напряжение подается.

A	B	S	R
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

Следовательно, эта схема И 4 не пропустит напряжение с выхода схемы ИЛИ 1 только в том случае, когда входное напряжение одновременно подается в точки A и B. Рассмотрев все возможные варианты, ты можешь убедиться, что на выходе S напряжение будет, когда оно подается только в A или только в B, но не одновременно на оба входа.

Н. — Это далеко не так просто, как ты обещал, но все же здесь можно разобраться. Только я не вижу, зачем нужен выход, обозначенный буквой R, который ты сделал после схемы И 2.

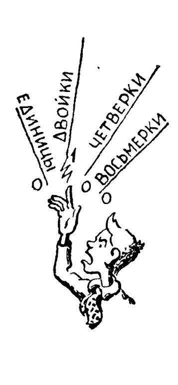
Л. — Призови на помощь свою память, Незнайкин: она должна подсказать тебе, что при сложении двоичных цифр запоминать единицу для переноса в следующий разряд приходится лишь в том случае, если обе слагаемые цифры равны единице; иначе говоря, выход R служит для запоминания переноса и сигнал на нем появляется в случае наличия напряжения одновременно в точках A и B.

Н. — А не можешь ли ты теперь рассказать мне о больших цифровых электронных вычислительных машинах?

Электрическое представление чисел

Л. — Прежде чем приступить к этому вопросу, я должен в нескольких словах рассказать о методах, используемых для представления чисел в электрической форме.

Двоичное число состоит из нескольких цифр, которые могут быть нулями или единицами. Предположим, что число состоит из n цифр. Выразить и передать это число в электрической форме можно двумя способами.



Сначала следует сказать о параллельной передаче числа; в этом случае для n цифр используется n проводов, в которые для передачи единицы подается напряжение, а для передачи нуля напряжение не подается, т. е. все цифры поступают одновременно, и для этого проводов требуется по числу цифр.

Второй метод представления носит название метода последовательной передачи числа. Он заключается в передачепмо-единственному проводу в установленном заранее темпе но пульсов или отсутствие этих импульсов, что соответствен и обозначает единицу или нуль. При передаче этим способом числа читаются справа налево.

Н. — Последний способ представляется мне опасным. Если в начале передаваемого числа окажется несколько нулей подряд, то будет совершенно невозможно определить, когда же начинается передача. Так, например, при таком преобразовании семизначного числа, состоящего из единицы с шестью нулями после нее, в твоем последовательном числе окажется всего лишь один импульс. Тогда будет очень трудно разобраться, приняли мы наше семизначное число или же число, состоящее всего лишь из одной единицы или одной двойки.

Л. — Для устранения такой неуверенности используют средство, хорошо известное всем спортсменам. Что делают, чтобы заставить всех бегунов на 100 *м* одновременно начать бег?

Н. — Поручают стартеру дать выстрел из пистолета.

Л. — И здесь поступают точно так же. По линии, по которой предстоит передавать цифры, посылают так называемый стар-

товый импульс, который обозначает начало передачи, и после него легко определить места, где должны находиться единицы, двойки, четверки и т. д. Во избежание риска спутать этот знак старта с цифровым импульсом этому условному сигналу придают другую длину, что позволяет его легко выделить.

Н. — Я считаю этот метод значительно разумнее метода параллельной передачи. Для передачи всех цифр любого числа достаточно одного провода. Однако одно в этом методе кажется мне очень странным; почему передачу начинают с единиц, переходя затем к двойкам, четверкам и т. д., ведь обычно цифры числа читают слева направо.

Сдвигающий регистр

Л. — Это всего лишь привычка, но ты же прекрасно знаешь, что выполнение ряда арифметических операций, таких как сложение и умножение, всегда начинают с единиц. Для удобства работы электронных вычислительных машин с этими последовательными числами лучше подавать эти числа единицами вперед. Что же касается самой приятной стороны последовательного способа представления числа — возможности обходиться одним проводом, то нельзя забывать, что за это положительное

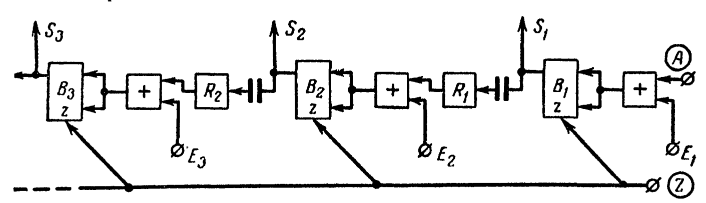


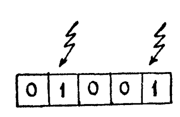
Рис. 130. Блок-схема сдвигающего регистра; схема способна запомнить двоичное число, которое подается на входы E. Импульс, подаваемый на вход Z, «продвигает» записанное число влево.

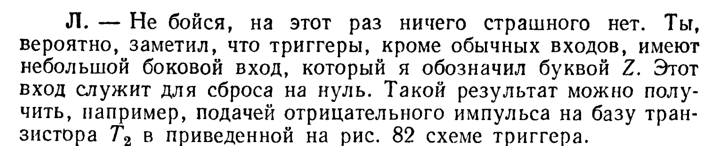
качество приходится мириться с двумя недостатками: во-первых, передача занимает больше времени; во-вторых, манипулировать полученным числом не так легко. А теперь рассмотрим, как устроено главное, как бы ключевое, устройство электронных вычислительных машин, которое называют сдвигающим регистром. Это своеобразная запоминающая скамья, по которой можно перемещать число на одну метку-разряд (за один прием).

Н. — Как ты намереваешься сделать это запоминающее устройство? К тому же мне думается сдвигать записанное число исключительно трудно.

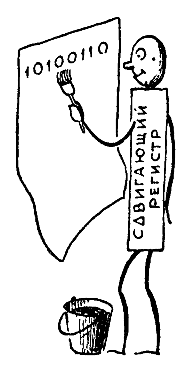
Л. — На рис. 130 я нарисовал схему трехкаскадного сдвигающего регистра. Как ты видишь, она представляет собой повторное использование определенной базовой схемы. Эта базовая схема содержит триггер, на один из его входов сигнал подается прямо, а на другой — через схему ИЛИ. Выходное напряжение триггера преобразуется в импульсы и подается на схему задержки, обозначенную на рисунке буквой R. Роль задерживающей схемы может выполнять схема с одним устойчивым состоянием, устройство которой я тебе уже объяснял.

Н. — Это представляется мне вполне понятным, но с некоторых пор я стал подозрительно относиться к твоим блок-схемам, которые за внешней простотой скрывают ужасающие трудности.




Л. — Не бойся, на этот раз ничего страшного нет. Ты, вероятно, заметил, что триггеры, кроме обычных входов, имеют небольшой боковой вход, который я обозначил буквой Z. Этот вход служит для сброса на нуль. Такой результат можно получить, например, подачей отрицательного импульса на базу транзистора T_2 в приведенной на рис. 82 схеме триггера.

Предположим, что мы имеем параллельное представление числа. Подадим его по всем необходимым для него проводам на входы E_1, E_2, E_3 и т. д. сдвигающего регистра, все триггеры которого установлены на нуль. Соединим провода, по которым передается число в параллельном представлении, с соответствующими входами: провод единиц с входом E_1, провод двоек с входом E_2 и провод четверок с входом E_3. Что произойдет теперь, если «параллельное» число подать в виде импульсов или отсутствия импульсов на различные входы нашего сдвигающего регистра?



Н. — Все это для меня настолько туманно, что я могу сказать тебе лишь, что триггеры, получившие импульс, переключатся с 0 на 1, а больше мне сказать нечего.

Л. — Да большего, Незнайкин, я и не спрашиваю. Как ты видишь, триггеры, соответствующие разрядам числа, где стоит единица, опрокидываются. Выходные напряжения этих триггеров служат своего рода памятью, в которой параллельным кодом записано наше число.

Н. — Для запоминания одного числа это, на мой взгляд, слишком сложно. Твое «параллельное» число поступает в виде комбинации импульсов и отсутствия импульсов. Если бы оно поступало в виде постоянных напряжений и отсутствия напряжений, вся твоя схема оказалась бы ненужной?

Сдвиг

Л. — Я полностью с тобой согласен. Но необходимо сказать, что схема обладает еще такими возможностями, о которых ты и не подозреваешь. Представь себе, что теперь я подаю на провод Z отрицательный импульс сброса на нуль. Что произойдет?

Н. — О, для того чтобы это узнать, совсем не нужно быть волшебником. Все триггеры вернутся на нуль, и содержимое твоей памяти окажется стертым.

Л. — Действительно, все так бы и случилось не будь в нашем устройстве схем задержки. При подаче импульса сброса на нуль все стоявшие в положении 1 (единицы) триггеры возвращаются на нуль. Но в момент опрокидывания они дадут импульс на включенные после них схемы задержки. Эти схемы получат импульс и через некоторое время отправят его на следующие триггеры.



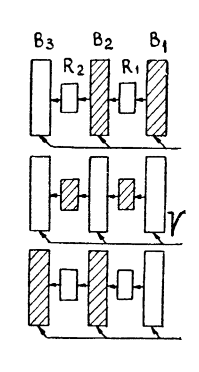
Н. — Но раз твои триггеры возвращены на нуль...

Л. — Я возвратил их на нуль подачей короткого импульса на вход Z. Но к тому моменту, когда получившие импульс схемы задержки передают его на следующие триггеры, поданный на вход Z импульс уже полностью закончился. Поэтому все получающие задержанный импульс триггеры назависимо от их предыдущего состояния переключаются в положение 1.

Н. — Охотно соглашусь, что все именно так и произойдет. Но чего ты добился таким любопытным маневром?

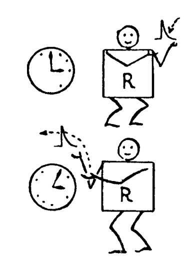
Л. — Очень просто, показания каждого триггера до возврата на нуль теперь переместились на соседний с ним триггер (в направлении справа налево). Если, например, я послал импульс на E_1 и E_2, но не дал его на E_3, то первоначально я получу

выходное напряжение на S_1 и S_2, но его не будет на S_3. Пошлем теперь импульс сброса на нуль. Опрокинувшись в положение нуль, триггеры B_1 и B_2 возбудят схемы задержки R_1 и R_2. Триггер же B_3 все время находился в положении нуль и на него сигнал сброса на нуль не окажет никакого воздействия. Следовательно, он не возбудит схемы задержки R_3. Немного позднее, когда схемы задержки R_1 и R_2 выдадут свои импульсы, возвращенный на нуль триггер B_2 опрокинется в положение 1 и оставшийся все время в положении нуль триггер B_3 также опрокинется в положение 1. Следовательно, теперь мы получим напряжение на выходах S_3 и S_2, а выход S_1 останется без напряжения. Если раньше наш регистр показывал число 011, то теперь он показывает 110. Мы переместили его показания на один знак влево, а на освободившееся справа место вписали нуль.



Н. — Если подобную операцию проделать с десятичным числом, т. е. сместить все цифры на один знак влево и справа приписать нуль, то исходное число увеличится в 10 раз. Но сейчас мы имеем дело с двоичным числом, и я не представляю, какой результат дает эта операция.

Л. — Но это очень просто — число умножается на 2. В этом заключается первая возможность нашей системы. Каждый посылаемый на провода Z импульс удваивает первоначально записанное число. Но наш сдвигающий регистр обладает еще более интересными возможностями Посмотри, какие импульсы выдаст триггер B_3 после трех последовательных сбросов на нуль с помощью подачи импульсов на вход Z.



Преобразование параллельного представления числа в последовательное

Н. — Чтобы мне было легче ориентироваться, я попробую разобраться на уже рассматривавшемся нами случае с первоначально записанным числом 011. Первый поданный на вход Z сигнал изменяет нашу запись на 110, но, как я полагаю, при этом мы должны учитывать и то обстоятельство, что триггер B_3 не даст импульса, ибо он переключается из положения 0 в положение 1.

Л. — В самом деле он дает только положительный импульс, который мы задерживаем с помощью диода. Следовательно, на выходе триггера B_3 ничего нет. А что произойдет при следующем сбросе на нуль?

Н. — О, теперь это ужасно сложно! Как я вижу, триггер B_2, находящийся в положении 1, под воздействием импульса Z опрокинется в положение нуль. По-моему, он должен дать на выход импульс, потому что нас интересуют только импульсы, соответствующие переходу на нуль. Импульс с триггера B_2 поступает на схему задержки R_2, откуда он через некоторое время поступает на триггер B_3 и переключает его на 1. Но я не очень хорошо представляю, что в итоге получилось.

Л. — В итоге мы получили импульс с триггера B_3 и записанное на регистре число превратилось в 100. При третьем переключении регистра на нуль мы вновь получим импульс с триггера B_3, потому что он переходит на нуль из положения 1. Теперь уже ни один триггер не может переключиться в положение 1, так как запись постепенно перемещалась и в результате полностью вышла за пределы регистра.

Н. — Но это более чем странно! Трехкратным переключением на нуль ты выталкивал цифру за цифрой записанное в регистре число. Только вытолкнул его не в том направлении, которое нам нужно; сначала мы получили отсутствие импульсов

(цифра четверок), затем получили один импульс (цифра двоек) и, наконец, еще один импульс (цифра единиц)

Л. — Совершенно верно, мы цифру за цифрой вытолкнули наше число с того места, где оно было записано. Иначе говоря, на выходе S_3 мы получили наше число в последовательной форме. Ты правильно заметил, что выходящее из регистра число заканчивается единицами. При желании получить его единицами вперед, следует записать число на трех триггерах в обратном порядке: единицы подать на вход E_3, двойки — на вход E_2 и четверки — на вход E_1.

Н. — Таким образом, мы можем сказать, что твой сдвигающий регистр способен преобразовывать параллельное представление числа в последовательное

Преобразование последовательного представления числа в параллельное

Л. — О, ты знаешь, транзисторы этой схемы способны (да позволят мне так сказать) не только на один фокус. Схема может выполнить и обратное преобразование. Представь себе, что мы подаем на вход A последовательное число и после передачи очередной цифры посылаем импульс сброса на нуль. Первая цифра записывается триггером B_1, а затем импульс сброса на нуль продвигает ее на триггер B_2. В этот момент следующая цифра записывается предварительно выставленным на нуль триггером B_1. Второй поступающий на вход Z импульс сброса на нуль продвигает первую цифру с триггера B_2 на триггер B_3 и вторую цифру с B_1 на B_2. В это время триггер B_1 выставлен на нуль и готов получить третью цифру, передаваемого на вход A числа в последовательной форме.

Н. — Действительно, очень умная схема, на этот раз она преобразовала последовательное представление числа в параллельное.

Параллельное сложение

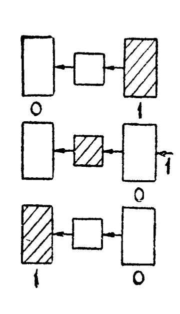
Л. — Но этим мы еще не исчерпали всех возможностей сдвигающего регистра Представь себе, что на входы E_1, E_2 и E_3 нашей схемы мы подали параллельное число. А через некоторое время подаем еще одно такое же число на эти же входы: единицы на E_1, двойки на E_2 и четверки на E_3. Что мы получим в результате?



Н. — Ужасную смесь!

Л. — Совсем нет. Рассмотрим, что произойдет на одном из триггеров. Предположим, что после записи первого числа он стоит на нуле. Если в соответствующем этому триггеру месте второго числа стоит нуль, то триггер не получит никакого импульса и останется на нуле. Но при записи второго числа наш триггер может получить импульс (на соответствующем ему месте находится единица) и тогда он переключится на 1. Возможно также, что при записи первого числа триггер получит импульс, а при записи второго импульса не получит. В этом случае, как и в предыдущем после передачи второго числа, триггер будет стоять на 1. Как ты видишь, во всех этих трех случаях на каждом триггере мы получим цифру, равную сумме соответствующих цифр из двух чисел

Н. — Очень занятно, но признайся, что все рассказанное тобой справедливо лишь для некоторых случаев.



Л. — Сейчас я докажу тебе, что справедливо для всех случаев. Предположим, например, что триггер B_1 при записи первого числа получил один импульс (что означает, что в первом числе на месте единиц стоит цифра 1). Теперь предположим, что при записи второго числа на вход E_1 поступил еще один импульс. Этот импульс переключит триггер на нуль и тем самым запишет последнюю цифру суммы двух полученных цифр. При опрокидывании на нуль триггер посылает импульс на схему задержки R_1. Этот импульс представляет собой не что иное, как единицу, переносимую при сложении в следующий разряд. После того, как сдвигающий регистр зафиксирует второе число, эта переносимая единица поступает на триггер B_2 и прибавляется к записанной в нем цифре, т. е. переключает триггер B_2 из одного состояния в другое.

Н. — Поразительно, твоя схема способна производить сложения и учитывать переносы единиц в следующие разряды. Это идеальное решение для создания сумматора.

Л. — Это возможное, но не наилучшее решение. Представь себе, что первым мы передали на сдвигающий регистр число 111, а вторым — число 001. Когда мы запишем второе число, триггер B_1 опрокинется и вернется на нуль. Через схему R_1 он передаст импульс на триггер B_2, который после соответствующей задержки опрокинется и вернется на нуль. Триггер B_2 через схему R_2 пошлет импульс на триггер B_3, который спустя еще один период задержки опрокинется и вернется на нуль. Как ты видишь, задержки накапливаются и может оказаться, что для завершения записи суммы потребуется значительное время.

Н. — Но ты сам в этом виноват; зачем ты поставил схемы задержки?

Л. — Твой вопрос, Незнайкин, заставляет меня думать, что ты не понял принцип работы сдвигающего регистра. Схемы задержки необходимы. В самом деле, когда я импульсом сброса на нуль продвигаю число вперед, все триггеры должны сначала переключиться на нуль, а затем те из них, которым предстоит опрокинуться, должны получить переданный через схемы задержки задержанный ими импульс. Кроме того, при использовании сдвигающего регистра для сложения параллельных чисел следует не допускать возможности одновременного поступления на триггер цифры второго числа и переносимой единицы, полученной в результате сложения цифр на предыдущем триггере.



Н. — Мне остается только поблагодарить тебя, Любознайкин, за напрасную потерю времени. Ты заставил меня отменно помучиться, чтобы понять устройство и принцип работы сдвигающего регистра, а теперь собираешься объявить мне, что воспользоваться им на практике нельзя.

Л. — Далеко не так, Незнайкин. Сдвигающий регистр можно очень хорошо использовать, впрочем, в ближайшее время мы познакомимся с очень интересным устройством, в котором работает этот регистр. Я просто хотел бы обратить твое внимание на следующее обстоятельство: может случиться, что при использовании сдвигающего регистра для сложения эта операция займет очень много времени. Но тогда мы постараемся воспользоваться другим методом, о котором поговорим завтра.

■

Беседа четырнадцатая

Совершается неизбежное: чем глубже Незнайкин изучает электронику, тем больше он увлекается. Он понял, что электронные схемы производят сложение двоичных чисел. Теперь он настолько подготовлен продолжать свое знакомство с вычислительной техникой, что уже может приступить к изучению электронного умножителя. Но прежде чем его интеллектуальные способности разрядятся, как конденсатор после вспышки лазера, ему необходимо еще понять, как работает запоминающее устройство на ферритовых тороидальных сердечниках.

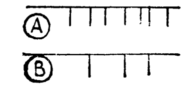
Умножители и запоминающие устройства

Незнайкин — Я нашел решение для построения сумматора: мы не испытаем никаких особых трудностей, если для каждой подлежащей сложению цифры возьмем схему, приведенную на рис. 129.

Любознайкин — Да, такое решение прекрасно подходит для сложения единиц двух чисел. Но проблема возникает уже при сложении двоек: иногда может появиться необходимость сложить три цифры (цифру двоек первого числа, цифру двоек второго числа и переносимую единицу, полученную при сложении единиц).

Н. — Я предполагаю, что тогда нам понадобится слегка изменить изображенную на рис. 129 схему — вместо ее двух входов сделать три.

Л. — На практике для сложения двоек можно просто взять две изображенные на рис. 129 схемы. Для упрощения рисунка я обозначил схему с рис. 129 (которая неоднократно используется на рис. 131 и последующих) прямоугольниками A, каждый из которых имеет два выхода: выход S для полученной суммы Σ и выход P для переносимой в следующий разряд единицы. Как ты видишь, схема A_1 получает цифру единиц первого числа (a_1) и цифру единиц второго числа (a_2). На выходе S_1 схемы мы получаем цифру суммы единиц, которую я обозначил Σ_a. Ты также видишь, что для сложения цифр двоек (b) наших чисел, обозначенных (b_1) и (b_2), мы используем схему A_2. Полученная на выходе схемы S_2 сумма поступает на один из входов аналогичной схемы A_3, на другой вход этой схемы поступает переносимая единица со схемы A_1. На выходе S_3 схемы A_3 мы получаем цифру суммы двоек Σ_b.



Н. — Я, кажется, понял. Но скажи пожалуйста, откуда выйдет переносимая в следующий разряд единица: со схемы A_2 или со схемы A_3, или с обеих сразу?

Л. — Уж конечно не с обеих сразу. В самом деле, для получения переносимой в следующий разряд единицы каждое из двух слагаемых, а именно b_1 и b_2 должно быть равно 1. В этом случае сумма на выходе схемы A_2 будет равна нулю. Тогда схема A_3, получив на один их входов нуль, может дать на выходе только подлежащую записи цифру, но не переносимую в следующий разряд единицу.

Н. — Я убедился, что подлежащая переносу в следующий разряд единица не может быть одновременно на выходе схемы A_2 и на выходе схемы A_3. Но тогда, как передать на сумматор четверок нашу переносимую единицу, которая может быть на выходе P схемы A_2 или на выходе P схемы A_3?

Л. — В своем вопросе, Незнайкин, ты использовал то самое слово, которое служит ответом. К сумматору четверок, состоящему из двух схем A, мы подключим выход P схемы A_2 или выход P схемы A_3 с помощью схемы ИЛИ.

На рис. 132 я изобразил для тебя устройство последующего звена сумматора. Все последующие каскады, начиная с кас-

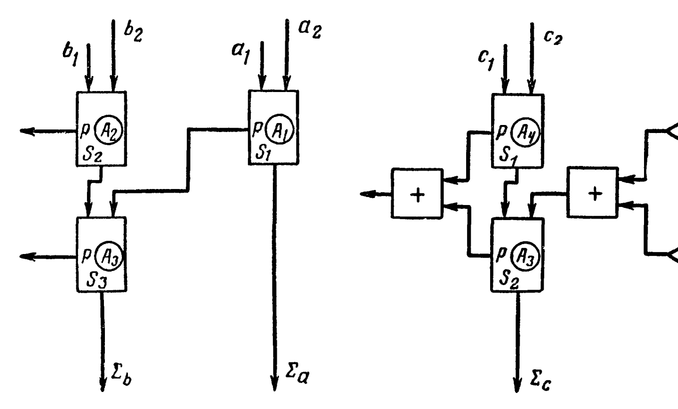
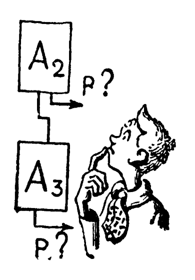


Рис. 131. Каскады единиц и двоек параллельного двоичного сумматора.

Рис. 132. Каскад четверок того же сумматора.

када четверок (c), устроены совершенно одинаково. Как ты видишь, параллельный сумматор не очень прост, но назвать его очень сложным все же нельзя.

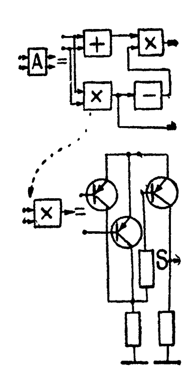
Н. — Что же тогда можно назвать сложным? Да меня бросает в дрожь, как только я вспомню, что каждый из прямоугольников, скромно названных тобой буквой A, представляет собой схему с рис. 129, в которой каждый квадратик обозначает самостоятельную схему, состоящую из нескольких транзисторов, диодов и резисторов.



Л. — Не волнуйся, Незнайкин. Системы для выполнения арифметических вычислений всегда состоят из большого количества одинаковых и относительно простых устройств, которые в свою очередь распадаются на еще более простые узлы. Но как бы то ни было, сумматор, блок-схема которого изображена на рис. 131 и 132, способен мгновенно выдать сумму двух «параллельных» чисел, поданных одно за другим на его входы.

Н. — А если мы захотим сложить числа, представленные в последовательной форме?

Л. — В этом случае следует взять аналогичное устройство, используя только две схемы A, одну схему ИЛИ для выдачи переносимых в следующий разряд единиц и одну запоминающую схему, служащую для приема переносимых из предыдущего разряда единиц, например, из разряда двоек в каскаде сложения четверок. Конструкция этого устройства относительно проста, но ее описание отвлекло бы нас от основной темы. Необходимо отметить, что последовательный сумматор состоит из меньшего



количества деталей, но он обладает серьезным недостатком — необходимостью запоминать выходящее последовательное число A в сумматоре, изображенном на рис. 131 и 132, ответ выдается незамедлительно (не требуется ждать, пока пройдут все цифры последовательного числа) и поступает на выход сразу же после подачи на входы слагаемых параллельных чисел.

Вычитание

Н. — Хорошо, теперь я более или менее умею складывать. Но скажи, пожалуйста, как производят вычитание?

Л. — Обычно проблему обходят. Предположи, что нам нужно из числа *A* вычесть число *B*. Для начала к *A* прибавляем одну единицу, а затем прибавляют противоположное *B* число (его также называют дополнением к *B*) и при этом сложении не учитывают переноса.

Н. — Что ты называешь противоположным *B* числом?

Л. — Очень просто, это число, которое получается из числа *B*, если все его нули заменить единицами, а все его единицы нулями.

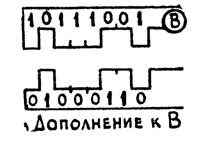
Число *B* меньше *A*, и поэтому слева к нему нужно дописать столько нулей, чтобы оба числа состояли из одинакового количества цифр. При преобразовании числа *B* в противоположное ему число все нули превращаются в единицы. Возьмем для большей наглядности числовой пример.

Предположим, что *A* равно 101101, (т. е. 45), а *B* равно 1011.

Н. — Иначе говоря, одиннадцати.

Л. — Браво, Незнайкин. Ты очень хорошо усвоил двоичную систему счисления. Следовательно, число *B* мы должны записать в следующем виде:

001011,



чтобы оно как и число *A* состояло из шести цифр. В результате преобразования его в противоположное ему число получаем:

110100

А теперь позволь мне, Незнайкин, задать тебе один вопрос: что мы получим, если это противоположное число прибавим к числу *B*?

Н. — Я думаю, что это сложение не представляет труда везде, где в одном из чисел стоит 1, в другом числе стоит нуль. Поэтому сумма этих двух чисел будет равна шестизначному числу, где все цифры 1, т. е. мы получим 111111.

Л. — Браво, совершенно верно! А теперь прибавь к полученному результату одну единицу.

Н. — Хорошо, если я прибавлю эту единицу, то сумма единиц даст нам нуль. Я переношу 1 в следующий разряд, прибавив ее к имеющейся здесь 1, я должен записать нуль на месте двоек и запомнить 1... Хм, очень любопытно, в итоге я получу 1000000.

+10110001101
01001110010
11111111111
Оч. хор. оценка: 10100
/в двоичной системе счисления/

Л. — Правильно. Но теперь в твоем числе семь цифр. Если пренебречь последним переносом, у нас останется лишь нуль. Как ты видишь, в результате сложения противоположного *B* числа, самого числа *B* и одной единицы мы получаем нуль. Иначе говоря, если пренебречь переносом, то сумма противоположного *B* числа и единицы даст нам нечто эквивалентное — *B*. Следовательно, для получения нужного результата мне достаточно прибавить это число к числу *A*. Операция имеет следующий вид.

```
    101101
 +  110100
 ----------
(1) 100001
```

Н. — Я вижу, что в полученном результате слева стоит единица в скобках. Это несомненно появилось вследствие того, что ты не хочешь учитывать последний перенос.

Л. — Совершенно верно. Если теперь прибавить еще одну единицу, то в результате получим 100010. Преобразовав двоичное число в десятичное, получим 34, которое точно соответствует разности 45 и 11.

Н. — Должен признаться, что, не прибегая к двоичной системе счисления, я получил бы верный результат значительно быстрее!

Л. — Ты, может быть. Но электронные машины считают в двоичной системе счисления быстрее, чем в десятичной, даже если учитывать время, необходимое для преобразования.

Умножение

Н. — Система автоматического счета положительно очень забавна. Не можешь ли ты объяснить мне, как производят умножение?



Л. — На этот раз ты проявляешь исключительную смелость. Схема устройства в самом деле довольно сложная.

Для начала я покажу тебе, как выглядит умножение двоичных чисел по правилам двоичной арифметики. Предположим, что нам нужно перемножить множимое 11010 (или 26) и множитель, равный 13...

Н. — Иначе говоря, 1101.

Л. — О! Ты действительно очень здорово преобразуешь десятичные числа в двоичные. Как ты видишь, наш множитель состоит из следующих слагаемых:

одна единица;

нуль двоек;

одна двойка в квадрате;

одна двойка в кубе.

Следовательно, для получения произведения, мы должны сложить следующие слагаемые:

единица, умноженная на множимое;

нуль, умноженный на это множимое, умноженное на два (иначе говоря, на множимое, к которому справа приписан нуль — 110100);

единица, умноженная на множимое, умноженное на четыре (иначе говоря на множимое, к которому справа приписали два нуля — 1101000);

единица, умноженная на множимое, умноженное на восемь (иначе говоря, на множимое, к которому справа приписали три дополнительных нуля — 11010000).

Следовательно, всю операцию умножения мы можем записать в следующем виде:

$$
\begin{array}{r}
\times\begin{array}{r}11010\\1101\end{array}\\
\hline
11010\\
00000\\
1101000\\
11010000\\
\hline
101010010
\end{array}
$$

Н. — Теперь, когда я достаточно привык к двоичной системе счисления, твое умножение мне в точности напоминает операцию умножения, которую мне столько раз приходилось выполнять

в десятичной системе счисления. Но больше всего меня смущает сложение частичных произведений. Я подозреваю, что выполнить эту операцию с помощью электронных схем окажется ужасно трудно.

Двоичный умножитель

Л. — Нет, сложность удается устранить благодаря широкому использованию сдвигающих регистров, о которых ты только что так презрительно отозвался. Вспомни, что эти схемы могут продвигать на один знак записанное число, т. е. умножать его на 2. Для этого в приведенной на рис. 130 схеме достаточно подать управляющий импульс на линию Z. Я полагаю, что теперь ты достаточно натренирован, чтобы смело приступить к ознакомлению с полной схемой умножителя, которую я изобразил на рис. 133. Множимое число мы записали на сдвигающем регистре CP_1. Множимое расположено так, что справа находятся

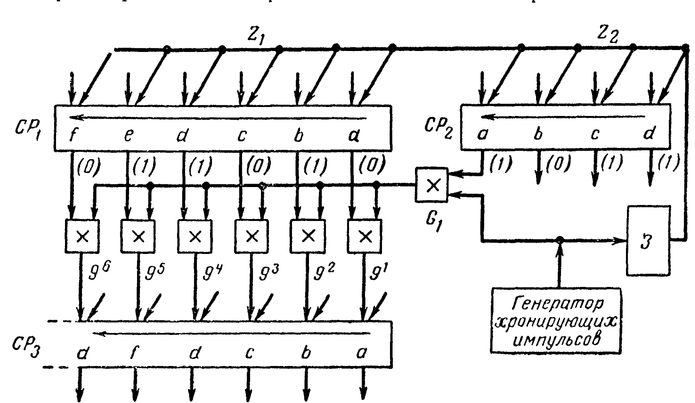
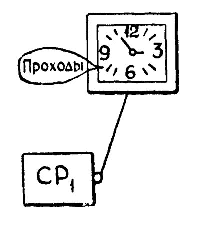


Рис. 133. Полная схема двоичного умножителя, в котором используются три сдвигающих регистра и генератор хронирующих импульсов. Буквой З обозначена схема задержки импульсов.

единицы (a), а влево от них места занимают двойки (b), четверки (c), восьмерки (d) и т. д. Управляющий сигнал, поступающий в линию Z_1, продвигает влево число, записанное на сдвигающем регистре CP_1.



Множитель записан на сдвигающем регистре CP_2. На этот раз единицы мы разместили на самом левом крае, а вправо от них по порядку записали двойки и т. д. Поступающий в линию Z_2 управляющий сигнал сдвигает записанное число — множитель тоже влево. Сумма записывается на третьем сдвигающем регистре CP_3, который работает только как сумматор. Сдвигающие регистры CP_1 и CP_2 имеют достаточное количество входов и выходов, чтобы операцию можно было выполнить полностью.

Расположенный справа маленький прямоугольник обозначает генератор хронирующих импульсов (или часы). Он задает ритм выполнения операции.

Рассмотрим, что происходит при приходе первого хронирующего импульса. Он может пройти через схему И, обозначенную буквой G_1, потому что цифра единиц записанного на сдвигающем регистре CP_2 числа представляет собой 1. Состояние регистров CP_1 и CP_2 к моменту прихода первого хронирую-

щего импульса я показал для тебя на схеме в скобках у выходов этих регистров. Здесь я воспользовался только что рассмотренным нами примером умножения двоичных чисел. В этих условиях первый импульс пройдет через схему G_1. Он поступит на все схемы g, расположенные между регистрами CP_1 и CP_3, и пройдет через те из этих схем, которые на второй вход получают с регистра CP_1 сигнал о наличии в соответствующем звене цифры 1...

Н. — Это становится ужасно сложно, и я ровным счетом ничего не понимаю!

Л. — Тогда рассмотрим более подробно. Как ты видишь, на выходе a (единицы) регистра CP_1 мы имеем нуль, а на выходе b (двойки) — цифру 1, на выходе c (четверки) — нуль, а на выходах d и e (соответственно восьмерки и шестнадцатки) по цифре 1. Первоначально на выходе a (единицы) регистра CP_2 находится цифра 1. Следовательно, первый хронирующий импульс пройдет через схему И, обозначенную буквой G_1. Отсюда он придет на правые входы всех других схем И, обозначенных буквами g^1 и g^2... g^6. В связи с наличием записанного на регистре CP_1 числа хронируюший импульс не пройдет на выход схемы g^1, пройдет на выход g^2, не пройдет на выход g^3 и пройдет на выходы схем g^4 и g^5. Надеюсь на этот раз ты меня понял?

Н. — Это ужасно сложно, но призвав на помощь все мои интеллектуальные ресурсы, я сумел более или менее понять.

Л. — Ты убедишься, что дальнейшее не сложнее того, в чем тебе удалось разобраться. Как ты видишь, первый хронирующий импульс запишет на сдвигающем регистре CP_3 множимое без каких бы то ни было изменений. После окончания этого импульса схема задержки $З$ (время задержки которой меньше интервала между двумя хронирующими импульсами) посылает сдвигающий импульс через линию Z_1 на регистр CP_1, через линию Z_2 на регистр CP_2. От этого импульса записанное на регистре CP_1 число сдвигается на одну цифру влево, иначе говоря, теперь на регистре записано число 110100, с которым мы уже встречались. Число, записанное на регистре CP_2, тоже смещается на одну цифру влево, иначе говоря, цифра двоек (нуль) теперь подается на верхний вход схемы G_1.

Следовательно, второй хронирующий импульс не пройдет через схему G_1, потому что поданная на верхний вход схемы G_1 цифра двоек числа — множителя, представляет собой нуль. Иначе говоря, произведение множимого на два не передается на сдвигающий регистр CP_3.

Второй хронирующий импульс вновь заставит работать схему задержки $З$; задержанный ею импульс через линию Z_1 поступит на регистр CP_1 и через линию Z_2 — на регистр CP_2. Этот импульс еще на одну цифру сдвинет влево число, записанное на регистре CP_1, которое превратится в 1101000, т. е. в произведение множимого на 4. Одновременно и множитель, записанный на регистре CP_2, сдвинется на одну цифру влево, в результате чего теперь на верхний вход схемы G_1 подается цифра четверок, а именно 1.

Следовательно, третий хронирующий импульс пройдет через схему G_1, а затем пройдет и через те схемы g, которые получают с выходов регистра CP_1 сигналы «1»; таким образом этот импульс вызовет передачу на регистр CP_3 числа, представляющего собой произведение множимого на 4 (множимое, сдвинутое влево на две цифры).

Н. — Но тогда это создает на регистре CP_3 ужасную смесь!

Л. — Совсем нет. Разве ты забыл, что сдвигающий регистр может производить сложение двух параллельных чисел? Для

получения суммы достаточно эти числа одно за другим подать на входы регистра.

Н. — Но ты мне объяснил, что для выполнения операции сложения сдвигающему регистру нужно очень много времени...

Л. — Ничего нельзя преувеличивать. Сдвигающий регистр может произвести сложение за время, равное сумме задержек всех входящих в него схем задержки. Операция может занять всего лишь несколько микросекунд. Во всяком случае мы представим ему необходимое время; нужно сделать так, чтобы хронирующие импульсы не очень быстро следовали один за другим. После прохождения третьего хронирующего импульса задержанный схемой *З* импульс вновь вызывает смещение на одну цифру влево множимого, записанного на регистре CP_1, и множителя — на регистре CP_2. Теперь на регистре CP_1 мы имеем множимое с приписанными справа тремя нулями (т. е. произведение множимого на восемь). С регистра CP_2 на верхний вход схемы G_1, теперь подается цифра восьмерок — это 1.

Четвертый хронирующий импульс может пройти через схему G_1, потому что цифра восьмерок числа-множителя представляет собой 1; проходя через соответствующие схемы g, хронирующий импульс запишет на сдвигающем регистре CP_3 произведение множимого на восемь. Регистр CP_3 произведет последнее сложение. Полученная сумма и есть окончательный результат производимой операции умножения.

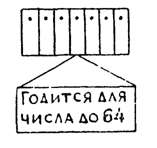
Н. — Теперь нам, по-видимому, следует принять меры, чтобы остановить систему, выдающую хронирующие импульсы?

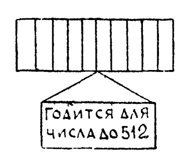
Л. — В этом нет необходимости. Не забывай, что после передачи по линии Z_2 с определенной задержкой четвертого импульса регистр CP_2 полностью «опорожнен». Последующие импульсы, если они и будет, не смогут пройти через схему G_1, потому что на ее верхнем входе всегда будет сигнал нуля

Н. — Я напрасно любовался двоичной счетной техникой; на мой взгляд этот умножитель просто кошмарный сон больного специалиста по электронике!

Л. — Я полностью согласен с тобою, что, только проявив максимум внимания, можно проследить за работой умножителя. Поэтому я освобождаю тебя от изучения делителя, который отличается еще большей сложностью и который действует как бы наощупь, подбирая результат методом вычитания.

Область применения цифровых вычислительных машин





Н. — Мне не хотелось бы тебя огорчать, Любознайкин, но, по правде говоря, эти цифровые вычислительные машины создают у меня такое впечатление, как если бы водородной бомбой захотели убить одну муху. Ты напихал в свою машину чудовищное количество транзисторов, диодов и других компонентов лишь для того, чтобы умножить 26 на 13! Вот уж действительно колоссальные средства для достижения ничтожного результата!

Л. — Ты сразу указал на очень важный вопрос возможностей использования цифровых вычислительных машин. Добавляя к изображенной на рис. 133 схеме умножителя дополнительные каскады, т. е. удлиняя сдвигающие регистры и увеличивая число других схем, можно наращивать возможности умножителя.

Н. — Согласен, но одновременно ты увеличишь и его сложность.

Л. — Совершенно верно, но ты не заметил одной особенности; каждый раз, когда я прибавляю один «ломтик» к сдвигающим регистрам и одну схему *g*, устройство приобретает способность работать с числами на одну цифру длиннее, т. е. с числами, в 2 раза большими; иначе говоря, добавляя один каскад я удваиваю возможности машины

Поэтому цифровая вычислительная машина, катастрофически разорительная при работе с числами, состоящими из 4 или 5 цифр, становится очень выгодной при работе с числами, состоящими из 20 или 30 цифр. Так, например, двоичному числу из 30 цифр соответствуют десятичные числа порядка миллиарда, а результат умножения получается исключительно быстро. Короче говоря, цифровые вычислительные машины в основном предназначены для получения высокой точности при действиях с числами, состоящими из большого количества цифр

7, 2 3 5

$\frac{2}{10}$ $\frac{3}{10^2}$ $\frac{5}{10^3}$

Десятичная

1 1, 0 1 1

② ① $\frac{0}{2}$ $\frac{1}{2^2}$ $\frac{1}{2^3}$

Двоичная

Н. — Если я правильно понял, ты хочешь сказать, что возможности машины растут по закону геометрической прогрессии, а количество ее каскадов увеличивается по закону арифметической прогрессии?

Л. — О боже! Хороший мне урок! Полагая, что ты всегда с трудом понимаешь мои объяснения, я на этот раз слишком упростил свой язык. Ты совершенно прав.

Н. — Но объясни мне, пожалуйста, почему ты говорил мне о высокой точности; я бы скорее сказал о больших числах, так как двоичные числа не имеют дробей.

Л. — Первый раз слышу! Ты можешь свободно написать двоичное число с запятой и с цифрами после этой запятой. Так, например, число 11,011 означает 3 целых (одна 2 + одна 1), а справа от запятой мы видим нуль, означающий, что дробная часть числа не содержит половины, второй после запятой стоит цифра 1, означающая наличие четверти, и следующая цифра 1 показывает, что имеется еще одна восьмая. Иначе говоря, расположенная справа от запятой часть числа означает следующее: нуль половин + одна четверть + одна восьмая, т. е. три восьмых Как ты видишь, здесь, как и в десятичной системе счисления, можно говорить о дробной части числа, отделяемой от остальной части числа запятой.

Н. — Вот система счисления, которая должна особенно понравиться англичанам. Традиционный английский дюйм, легко делится на половинки, четверти, восьмые и т. д При такой системе счисления относительно просто говорить о 17/64 дюйма.

Л. — Признаюсь, что это никогда не приходило мне в голову. В самом деле можно было бы подумать, что двоичную систему обозначения дробей придумали, чтобы доставить удовольствие тем, кто пользуется этими замысловатыми дюймами и их невероятными долями. А теперь, чтобы у тебя сложилось общее представление о цифровых вычислительных машинах, нам стоит сказать несколько слов о системах памяти.

Н. — Что за любопытное утройство? Для чего оно служит?

Запоминающие устройства

Л. — Запоминающие устройства в вычислительных машинах выполняют ту самую роль, что и бумага, которой мы пользуемся при выполнении расчетов Во время работы часто приходится записывать промежуточные результаты, чтобы продолжать проводимое вычисление или использовать их позднее. В вычислительной машине благодаря использованию двоичной системы счисления нам нужно лишь зафиксировать в интересую-

щих нас каналах наличие или отсутствие сигнала, что соответствует нулям или цифрам 1. Необходимо сделать так, чтобы результат операции (или данное в условии число) можно было записать.

Н. — Но об этом ты мне уже говорил. Эту задачу можно очень хорошо выполнить с помощью сдвигающего регистра.

Л. — Совершенно верно; сдвигающий регистр содержит триггеры — они могут использоваться в запоминающей системе. В зависимости от состояния, в котором они находятся (опрокинутый триггер или в состоянии покоя), сигналы, даваемые ими, могут соответственно представлять цифры 1 или нули

Н. — Так значит в качестве запоминающего устройства мы воспользуемся сдвигающими регистрами?

Л. — Иногда так и делают, но в большинстве случаев такое решение оказалось бы ненужной роскошью. Вполне достаточно простых триггеров. На один из их входов можно подавать

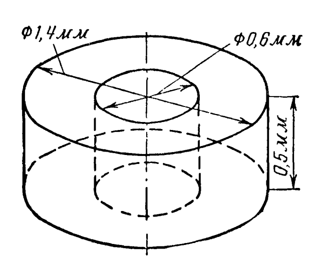
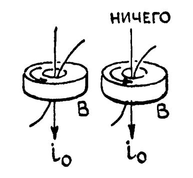


Рис. 134. Ферритовое кольцо, служащее элементом запоминающего устройства благодаря своей способности намагничиваться в одну или в другую сторону.

подлежащие запоминанию импульсы, получившие такой импульс триггеры переключатся и останутся в нем до тех пор, пока их не вернут в исходное состояние, т. е. «сбросят на нуль».

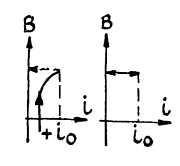


Но я хочу рассказать тебе в нескольких словах о более простых запоминающих устройствах. Существует весьма интересный класс запоминающих систем, в которых используются маленькие кольца из ферритов (так называют материалы, состоящие из железа, кислорода и некоторых металлов, которые изготовляются наподобие керамики).

Н. — Ну вот теперь-то я, наконец, услышу объяснение загадочных «тороидов с прямоугольной петлей», о которых я часто слышал, но так толком и не понял, что это такое.

Л. — Именно о них и пойдет у нас речь. Можно сделать ферриты, способные сохранять намагниченность в том или другом направлении при воздействии на них магнитным полем достаточной напряженности. Предположим, что мы взяли маленькое кольцо, которое я изобразил для тебя на рис. 134...

Н. — Хм, если у тебя нет с собой лупы, тебе придется немало потрудиться, чтобы рассмотреть или найти это кольцо!



Л. — В этом-то и заключается одно из важнейших достоинств системы; малые размеры кольца позволяют сделать запоминающие устройства, содержащие в ограниченном объеме огромное количество элементов. Продернем через отверстие маленького кольца провод и пропустим по нему ток. Если ток превышает некоторую величину (например, для нашего кольца 0,7 *а*), вся система оказывается намагниченной в определенном направлении; при этом силовые линии магнитного поля замыкаются в кольце.

Н. — Значит ли это, что наше кольцо превращается в своеобразный магнит?

Л. — Нет, оно не обладает никаким внешним магнитным полем, так как силовые линии замыкаются внутри феррита. Но

мы располагаем средством, позволяющим узнать, в каком направлении намагничено кольцо. Представь себе, что кольцо было намагничено током больше 0,7 *а*, протекающим по проводу в определенном направлении, а после этого мы посылаем по этому же проводу ток больше 0,7 *а*, но в другом направлении — кольцо перемагнитится в другую сторону

Н. — Я охотно тебе верю, но должен признать, что в моих знаниях ничего не прибавилось — твое кольцо, как и раньше, не обладает внешним магнитным полем.

Л. — Согласен, но представь себе, что мы пропустили через кольцо второй провод. Он станет своеобразной одновитковой вторичной обмоткой трансформатора, в котором другой провод служит первичной обмоткой, а ферритовое кольцо играет роль сердечника. При изменении направления намагниченности сердечника во втором проводе наводится напряжение. Таким образом, мы располагаем средством, позволяющим узнать, изменилось или нет направление намагниченности сердечника.

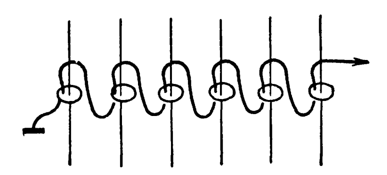
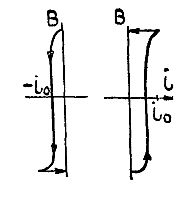


Рис. 135. Запоминающее устройство на магнитных тороидальных сердечниках, в каждом из которых проходят провод записи и запроса (вертикальный) и провод считывания.

Представь себе десять колец, подобных только что описанному. Через каждое кольцо пропущен отдельный провод, который мы назовем обмоткой записи. Кроме того, имеется еще один провод, проходящий через все кольца, который мы назовем обмоткой считывания (рис. 135). Для начала переключим всю систему в состояние, соответствующее нулю; для этого пошлем во все десять вертикальных проводов по направлению сверху вниз токи больше 0,7 *а*. Такое действие называют стиранием информации в запоминающем устройстве. А теперь по проводам, проходящим через кольца, где нам нужно записать единицы, пошлем снизу вверх токи больше 0,7 *а*. Соответствующие кольца перемагничиваются. Теперь для запроса запоминающего устройства нам нужно поочередно послать токи больше 0,7 *а* по всем десяти вертикальным проводам по направлению сверху вниз. Те из колец, которые при записи цифр получили ток снизу вверх, перемагничиваются и тем самым наводят напряжение в обмотке считывания. Как ты видишь, таким образом нам удалось сделать запоминающее устройство.



Н. — Это-то я вижу, но два обстоятельства вызывают у меня чувство сожаления; во-первых, при считывании информации ты вынужден стирать имеющуюся запись и, во-вторых, твоя система из колец, пронизанных проводами, число которых соответствует количеству записываемых данных, представляется мне несколько сложной.

Запоминающие устройства из строк и колонок

Л. — Ты совершенно правильно заметил, что один из недостатков системы заключается в разрушении записи при считывании. Можно предусмотреть специальные устройства, которые сразу же после считывания восстанавливают намагниченность тороидальных сердечников, соответствующую записи еди-

ницы. Такие устройства естественно усложняют систему, но они получили широкое распространение.

Необходимо отметить, что ферриты позволяют создать запоминающее устройство без стирания записи в процессе считывания. Примером может служить запоминающее устройство на ферритовой пластине с большим количеством отверстий, но я не стану его подробно описывать Я предпочитаю уделить большее внимание твоему вопросу относительно сложности системы на тороидальных сердечниках. Систему можно значительно улучшить, если для записи единицы на тороидальном сердечнике использовать не один, а два провода В каждый из этих проводов мы пошлем ток 0,4 *а*. Тогда запись будет производиться только в том случае, если ток протекает одновременно по двум проводам; наличие тока только в одном из проводов никак не скажется на состоянии сердечника.

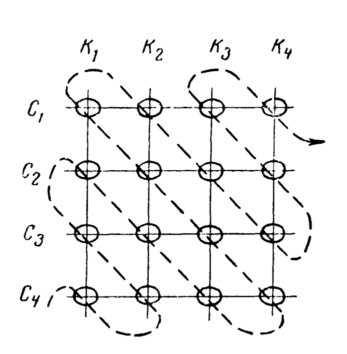
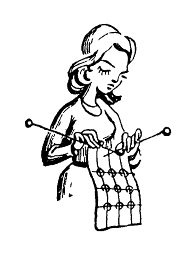


Рис. 136. Квадратная матрица запоминающего устройства из ферритовых тороидальных сердечников. Пунктирной линией показан провод считывания, по которому снимают напряжения, когда запрашивают намагниченный сердечник, расположенный в точке пересечения двух проводов.

Н. — Одним словом, получилась своеобразная схема И.

Л. — Совершенно верно. Эта система интересна тем, что позволяет вести запись по строкам и по колонкам Посмотри на рис. 136; я расположил 16 тороидальных сердечников в точках пересечения четырех колонок (столбцов) $K_1...K_4$ и четырех строк $C_1..C_4$. Провод считывания пронизывает все кольца; на рисунке он показан пунктирной линией Для записи единицы в сердечнике, расположенном на пересечении третьей колонки и второй строки, нужно послать ток 0,4 *а* по проводу K_3 сверху вниз и по проводу C_2 слева направо. Только интересующий нас сердечник получит эквивалент тока 0,8 *а* и соответствующим образом изменит свое магнитное состояние. Когда нам понадобится прочитать имеющуюся в этом сердечнике запись, мы пошлем токи запроса 0,4 *а* по проводу K_3 снизу вверх и по проводу C_2 справа налево. Если тороидальный сердечник в третьей колонке и во второй строке содержит запись, и только в этом случае, в проводе считывания появится наведенное напряжение.



Как ты понимаешь, используя 16 колонок и 16 строк, можно создать сетку, именуемую «матрицей запоминающего устройства», содержащую при очень небольшом объеме 256 элементов.

Н. — В самом деле очень хитрая система, но я не хотел бы быть на месте тех, кому придется делать такие матрицы, ведь эта работа для женщины с вязальными спицами.

Л. — Действительно, изготовлением матриц запоминающих устройств обычно занимаются женщины. А операцию сборки из-за определенной аналогии структуры матрицы со структурой ткани называют «ткачеством». Устанавливая параллельно

большое количество матриц, создают комплексное запоминающее устройство, позволяющее записать очень большое число данных

А теперь я хочу показать тебе еще одно интересное запоминающее устройство, в котором используются туннельные диоды.

Запоминающее устройство на туннельных диодах

Н. — Правда, я довольно плохо знаю эти приборы и совершенно не представляю, как можно их использовать для создания запоминающих устройств.

Л. — Туннельный диод при напряжении, превышающем некоторый уровень (скажем 0,4 *в*), ведет себя в проводящем направлении, как обычный диод. А при напряжении ниже этого уровня при пропускании тока в том же направлении наблюдается совершенно парадоксальная картина — при снижении напряжения ток диода увеличивается. Характеризуя это явление,

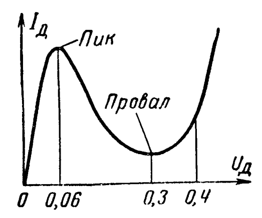


Рис. 137. Вольт-амперная характеристика германиевого туннельного диода

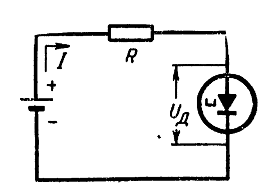
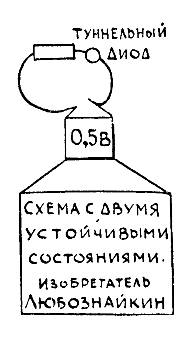


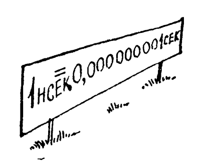
Рис 138. Схема использования туннельного диода в качестве запоминающего элемента.

говорят о наличии зоны отрицательного сопротивления. Некоторому напряжению, именуемому пиковым напряжением, соответствует максимальное значение тока. При дальнейшем уменьшении напряжения ток очень быстро снижается до нуля. На рис. 137 я изобразил кривую, характеризующую изменение тока диода в зависимости от напряжения на его выводах. При питании такого туннельного диода заданным напряжением через соответствующим образом подобранный резистор можно получить систему с двумя устойчивыми состояниями.



Н. — Но я совершенно не вижу, как получить такой результат!

Л. — Посмотри приведенную на рис. 138 схему. На этот раз ты должен признать, что она не столь уж сложная. Попробуем определить ток *I* диода и напряжение на его выводах *U*. Иначе говоря, нам нужно найти такую пару значений *I* и *U*, которая одновременно устроила бы потребителя (туннельный диод) и поставщика электроэнергии (батарею с электродвижущей силой *e* и внутренним сопротивлением *R*). Кривая требований потребителя приведена на рис 137. А предписанные поставщиком соотношения величин *U* и *I* согласно закону Ома характеризуются прямой, которую ты знаешь под названием «нагрузочная прямая» или «нагрузочная характеристика» На рис. 139 я начертил вольт-амперную характеристику туннельного диода и провел нагрузочную прямую; как ты видишь, пары значений *U* и *I*, соответствующие устойчивому состоянию, графически обозначены точками *A* и *B*.



Н. — Туннельный диод, действительно, чудесный прибор; для создания схемы с двумя устойчивыми состояниями требуются всего лишь батарея, один резистор и один диод. Но что ты сделаешь с точкой *C*. Это еще одно возможное состояние?

Л. — Да, возможное, но неустойчивое. В этом месте динамическое сопротивление туннельного диода имеет отрицательную величину, и соответствующее ей состояние не может долго сохраняться.

Как ты видишь, на нескольких туннельных диодах можно создать запоминающее устройство. Его преимущество в исключительном быстродействии; запись занимает лишь ничтожную долю микросекунды, а точнее, время здесь измеряется наносекундами, т. е. миллиардными долями секунды. В запоминающих устройствах на ферритовых тороидальных сердечниках в лучших случаях удается достичь микросекунды, так как для перемагничивания феррит требует некоторого времени. На туннельных диодах, если каждый из них питать через два резистора, можно сделать, как на ферритовых тороидах, матрицы для записи по строкам и колонкам. Кроме того, на этих диодах несложно сделать нестираемую при считывании запись.

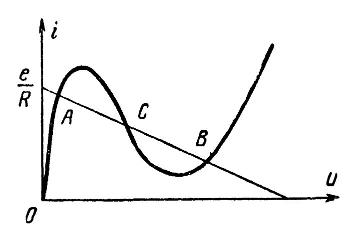
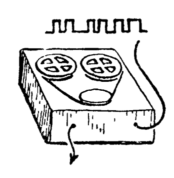


Рис. 139. Три возможных состояния изображенной на рис. 138 схемы. Только точки *A* и *B* соответствуют устойчивым состояниям.

Н. — Теперь нет никаких сомнений, что если когда-нибудь мне придется делать цифровую вычислительную машину, ее запоминающее устройство будет, несомненно, на туннельных диодах.

Л. — Идея хорошая, но, к сожалению, на пути ее осуществления имеется одно препятствие, которое в ближайшее время бесспорно уменьшится — туннельные диоды пока еще относительно дороги.

Запоминающие устройства для последовательных чисел



Н. — А как следует поступить, если мне понадобится записать в запоминающем устройстве последовательное число?

Л. — Такое число можно как обычный сигнал записать на магнитной ленте. Для этой цели довольно часто используют также барабан, покрытый магнитным слоем. Барабан очень быстро вращается, а в это время многочисленные головки на большом количестве дорожек записывают нужную информацию. Неудобство этой системы заключается в относительно большом времени доступа к записанным данным.

Н. — Но прости, пожалуйста, Любознайкин, ты до сих пор не сказал, как можно умножить одно последовательное число на другое.

Л — Должен признаться, что схемы умножителя для последовательных чисел я не знаю Но если ты внимательно посмотришь на схему, изображенную на рис. 133, то заметишь, что

множимое и множитель записываются на сдвигающих регистрах. А как я тебе объяснил, эти устройства позволяют легко преобразовать последовательное число в параллельное. Если бы мне понадобилось перемножить два последовательных числа, то для начала я, преобразовав эти числа в параллельные, записал их на сдвигающих регистрах CP_1 и CP_2 в схеме, приведенной на рис. 133.



Я могу сказать, что теперь ты владеешь основными знаниями о системах, производящих сложение, вычитание и умножение, а также познакомился с запоминающими устройствами; ты имеешь представление об устройстве цифровых электронных вычислительных машин, которые позволяют все быстрее и быстрее выполнять очень сложные вычисления

Н. — В этом я с тобой полностью согласен, но должен тебе сказать, что, прибавляя трудности и умножая различные ловушки, ты полностью отнял у моего мозга серое вещество, и я чувствую, что все мои запоминающие устройства полностью размагнитились. Если ты не возражаешь, я предлагаю продолжить в следующий раз, а еще лучше через несколько дней, чтобы я смог придти в себя после принятой «цифровой ванны».

Беседа пятнадцатая

Незнайкин вот-вот станет инженером-консультантом Он только что создал небольшую систему для управления антенной, но он намерен добиться лучших результатов Любознайкин не хочет упустить представившийся случай познакомить Незнайкина с сервомеханизмом (с присущей ему скрытой опасностью возникновения колебаний всей этой системы) и указать на аналогию между сервомеханизмом и усилителем с отрицательной обратной связью

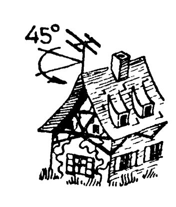
Сервомеханизмы

Незнайкин — Как я рад видеть тебя, Любознайкин! Возможно ты поможешь мне найти решение проблемы, которая вот уже несколько дней не дает мне покоя.

Любознайкин — Так расскажи яснее о своих затруднениях, я весь внимание.

Передача данных о положении

Н. — Один из моих приятелей коротковолновик-любитель имеет направленную антенну. Он попросил меня помочь ему сделать для этой антенны систему управления, так как, находясь у своей рации в комнате, он не может видеть установленную на крыше антенну, а ему нужно всегда знать, в какую сторону она направлена. Для получения информации о направлении антенны я предложил ему воспользоваться потенциометром, так как ты в свое время объяснил мне, что потенциометры можно использовать в качестве датчика положения



Л. — Решение в принципе хорошее, но для твоего приятеля неприемлемое, потому что, как ты знаешь, потенциометр не может работать в пределах полного оборота — у него имеется определенный «мертвый» угол.

Н. — Об этом недостатке я знаю, но для данного случая он не имеет значения, так как рядом с домом моего приятеля находится огромное здание, практически закрывающее для его передач угол около 45° Поэтому угол вращения его антенны ограничен, и он даже поставил упоры, не дающие поворотному механизму выходить за пределы рабочего пространства (рис. 140) Я нашел для него очень хороший потенциометр с мертвым углом всего лишь в 5° и помог ему сделать для поворачивающего антенну двигателя систему управления на двух транзисторах, чтобы мой приятель мог управлять всем своим сооружением с помощью маленького переключателя Вольтметр, измеряющий напряжение между движком потенциометра и одним из его выводов, позволяет определить угол поворота антенны.

Л. — Все это очень хорошо И я не вижу, какой совет я мог бы тебе дать На мой взгляд, ты прекрасно справился с поставленной задачей.

Н. — Хм. . только наполовину. По правде говоря, и я и мой приятель не очень довольны полученными результатами.

Двигатель обладает определенной инерционностью, и чтобы антенна остановилась в нужном месте, его необходимо выключить немного раньше. Чаще всего антенна проскакивает нужный угол, и ее приходится поворачивать в обратную сторону. Нередко она вновь проскакивает заданный угол, и тогда приходится продолжать управление ею.



Л. — Я не только знаю решение, но и очень рад, что ты поставил передо мной эту проблему. Представь себе, что мы хотим заставить антенну совершить определенное движение, а точнее говоря, заставить ее занять заданное положение. В качестве органа управления мы используем второй потенциометр,

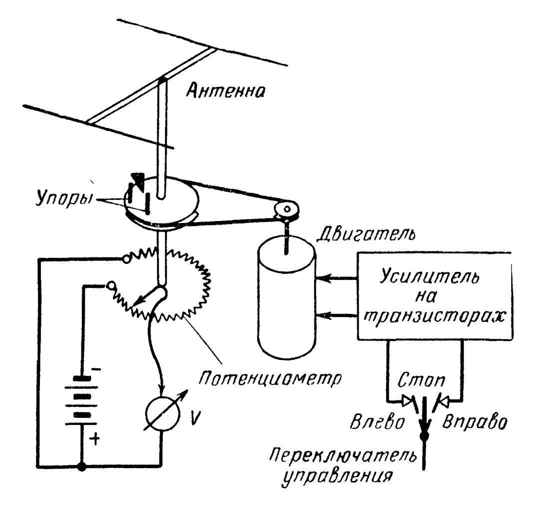
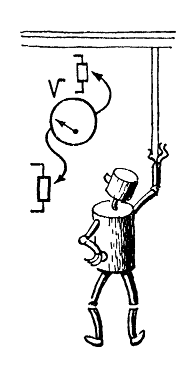


Рис. 140. Антенна поворачивается двигателем, управляемым током усилителя. Для определения занимаемого антенной положения с ее осью соединяется ось потенциометра, напряжение с которого указывает угол поворота антенны по шкале вольтметра V.

который по мере возможности должен быть идентичным потенциометру, механически соединенному с антенной. Я могу даже посоветовать тебе укрепить этот второй потенциометр на доске, пропустив сквозь нее его ось. На доску ты можешь наклеить карту мира и тогда стрелка, соединенная с движком потенциометра, прямо покажет, куда направлена антенна.



Н. — Если в дополнение к изложенному ты расскажешь мне, как создать такую систему, то я стану в глазах моего приятеля самым великим инженером всех времен.

Л. — Ты увидишь, что для этого достаточно нескольких часов. Мы подадим одно и то же постоянное напряжение на обмотку антенного потенциометра и второго потенциометра, который назовем управляющим.

Это мы сделаем для того, чтобы добиться равенства потенциалов на движках управляющего и антенного потенциометров.

Н. — Понятно, я даже догадываюсь, что ты сейчас предложишь сделать. Ты скажешь, что вольтметр следует включить между движками потенциометров и, воздействуя на управляющее двигателем устройство, выставить вольтметр на нуль

Л. — В одном ты прав, воздействие на занимаемое антенной положение сведет разность потенциалов между движками потенциометров к нулю. Только осуществлять эту операцию будет не твой друг, а автоматическая система.

Представь себе, что разность потенциалов между двумя движками подается на вход усилителя, выходной ток которого вращает двигатель антенны. Если твой усилитель сделан хорошо и правильно пропускает постоянную составляющую, твоя проблема частично уже решена.

Н. — Чудесно! Я немедленно отправляюсь к своему приятелю устанавливать эту систему и...



Л. — И поссоришься с ним до конца своих дней! Если ты установишь эту систему без специальных мер предосторожности, то будешь пренеприятно удивлен зрелищем судорожно дергающейся антенны; антенна будет непрерывно дергаться до тех пор, пока не разрушится сама или не выйдет из строя двигатель, или не произойдет одновременно и то и другое.

Н. — Ты верен себе. Сначала описываешь заманчивое решение, а затем, не объясняя причин, заявляешь, что воспользоваться им нельзя!

Демпфирование

Л. — Не горячись, нужно просто внести в первоначальную схему небольшие усовершенствования, и она станет пригодной для практического использования. Колебания, о которых я тебе говорил, действительно могут произойти. Они вызываются тем, что при автоматическом управлении антенна и двигатель ведут себя точно так же, как и при испытанном тобой ручном.

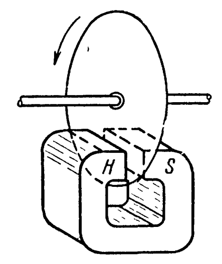


Рис. 141. Вращающийся в межполюсном зазоре магнита диск тормозится токами Фуко; чем выше скорость, тем больше сила торможения.

Когда двигатель приводит в движение антенну, чтобы привести ее в заданное положение, он приобретает определенную инерцию. В момент прихода антенны в нужное положение двигатель обесточивается, но инерция заставит его проскочить заданное положение, в результате чего напряжение на его выводах переменится и двигатель начнет вращаться в обратную сторону. Возможно, что возникшие таким образом колебания успокоятся и все сооружение войдет в состояние устойчивого равновесия, но также возможно, что колебательные движения будут продолжаться бесконечно. В этот момент должна включиться система гашения колебаний.

Н. — Я знаю, как вызвать затухание колебаний в контуре, но не представляю, как остановить колебательные движения двигателя?

Л. — И тем не менее используемые в обоих случаях способы весьма сходны. Чтобы вызвать затухание колебаний в контуре, к его выводам подключают сопротивление, вызывающее рассеяние энергии на этом сопротивлении А для остановки двигателя в качестве первого решения я советую тебе расположить на его оси систему с высокой вязкостью. Это своеобразный тормоз — чем выше скорость, тем больший создается тормозной момент. Подобный результат можно получить с помощью очень простого устройства (рис. 141), состоящего из медного диска, помещенного в межполюсный зазор мощного магнита. Наводимые в массе

диска токи (токи Фуко) порождают силы, тормозящие вращение диска; чем выше скорость вращения диска, тем эффективнее воздействуют на него силы торможения. В этих условиях приблизившаяся к заданному положению антенна не сможет значительно проскочить предназначенную точку и после нескольких колебаний с небольшой амплитудой окончательно установится в нужном месте.

Н. — Да, это решение осуществимо, но оно мне совершенно не нравится, ибо, используя его, мы в значительной мере ограничиваем скорость двигателя. Это очень хорошо, когда антенна почти подошла в заданное положение, но не очень полезно, когда антенна находится еще далеко от предназначенной ей точки. Твоя система значительно увеличивает время, необходимое для установки антенны в рабочее положение.

Л. — Вызываемая задержка несколько меньше, чем ты думаешь. Не забывай, что чем дальше находится антенна от места, куда она должна прийти, тем больше напряжение между ползунками потенциометров. Поэтому подаваемое на двигатель напряжение увеличивается по мере увеличения предстоящего антенне пути. Следовательно, при большом пути двигатель может вращаться довольно быстро, несмотря на торможение; воздействие последнего становится преобладающим, когда антенна находится недалеко от заданной точки. А теперь я готов согласиться с тобой в том, что рассмотренное нами решение небезупречно.

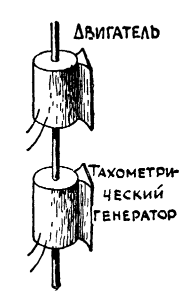
Демпфирование с помощью тахометрического генератора

Н. — Было бы очень хорошо иметь такой тормоз, который вступал в действие только в тот момент, когда антенна приближается к заданному положению, и лишь в том случае, если в этот момент двигатель вращается слишком быстро.

Л. — Незнайкин, ты стоишь на совершенно верном пути. Для решения сформулированной тобой задачи нужно наряду с напряжением между движками потенциометров ввести в усилитель, управляющий двигателем, напряжение, пропорциональное скорости вращения двигателя. Наиболее простой способ осуществления этой идеи заключается в механическом подключении к двигателю динамомашины, которую в подобных системах называют т а х о м е т р и ч е с к и м   г е н е р а т о р о м. Этот генератор дает напряжение, пропорциональное скорости вращения двигателя, которое вычитают из разности потенциалов между движками потенциометров (рис. 142).

Н. — Но зачем понадобилось спаривать динамомашину с двигателем? Ведь совсем недавно ты объяснил мне, что двигатель постоянного тока и динамомашина одно и то же. Я еще до сих пор не забыл, что во время работы двигатель вспоминает, что он еще и динамомашина, и это проявляется в возникновении противо-э. д. с. Нельзя ли ею воспользоваться?

Л. — Отчасти ты прав, но использовать эту э. д. с. не всегда удобно. В самом деле, напряжение на зажимах двигателя представляет собой сумму э. д с. и падения напряжения, вызываемого прохождением тока по обмотке якоря, обладающей определенным сопротивлением Имеются схемы, позволяющие воспользоваться напряжением на зажимах двигателя для получения напряжения, пропорционального скорости, которое затем используется для демпфирования всего устройства. Однако эти схемы отличаются большой сложностью, и я не советую тебе ими



увлекаться. Ведь не следует забывать, что наш двигатель подключен к выходу усилителя и что поэтому тебе не так легко будет определить напряжение на его зажимах А при спаренном с двигателем тахометрическом генераторе ты получишь пропорциональное скорости вращения напряжение на двух не соединенных

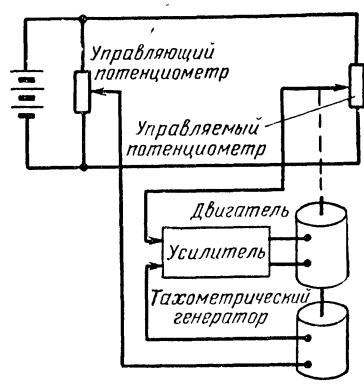
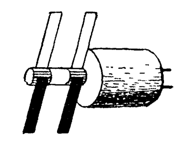


Рис. 142. В этом сервомеханизме напряжение, выдаваемое тахометрическим генератором, вычитается из напряжения ошибки (разности потенциалов между движками двух потенциометров). В этих условиях двигатель может вращаться быстро лишь при большом напряжении ошибки; когда управляемый потенциометр приближается к заданному положению, двигатель уже не может вращаться так быстро, как раньше — таким образом тахометрический генератор замедляет вращение двигателя при подходе к заданной точке и тем самым устраняет проскакивание ее и колебательные движения всего подвижного сооружения относительно заданной точки.

с корпусом проводах, которое можно очень легко вычесть из разницы потенциалов между движками потенциометров. В случае необходимости ты даже можешь с помощью диодов или аналогичных им приборов ограничить даваемое динамомашиной напряжение. Таким образом, удается ограничить соответствующее скорости торможение, что позволяет при значительной разнице в положении движков потенциометров получить очень высокие скорости вращения системы двигатель — тахометрический генератор.

Н. — Решение в самом деле очень изящное, но воспользоваться им будет довольно трудно, так как все механические элементы системы управления антенной уже смонтированы и я не знаю, хватит ли мне места уместить тахометрический генератор.

Коррекция с помощью дифференцирующей схемы



Л. — В продаже можно найти небольшие двигатели, которые сами содержат тахометрический генератор. Провода обмоток двигателя и динамомашины намотаны вместе, но электрически изолированы друг от друга; такой двигатель имеет два независимых коллектора и две пары щеток. Однако на тот случай, если ты хочешь как можно меньше переделывать уже существующую установку, можно воспользоваться другим,

правда менее совершенным решением, которое, однако, дает не такие уж плохие результаты Для его осуществления ты должен подать напряжение с движка антенного потенциометра на дифференцирующую схему наподобие изображенной на рис. 64. Так как приложенное к ее входу напряжение пропорционально занимаемому антенной положению, то на выходе диференцирующей схемы ты получишь напряжение, пропорциональное скорости вращения антенны. Должным образом усиленное выходное напряжение этой схемы вместе с разностью потенциалов между движками потенциометров подается на вход усилителя, что позволит осуществить демпфирование движения системы. Может быть, результаты будут несколько хуже, чем при использовании системы с тахометрическим генератором, но в этом случае можно обойтись наименьшей переделкой уже построенной установки.

Н. — Полагаю, что теперь ты нашел наилучшее для меня решение, и я, несомненно, им воспользуюсь. Мой приятель будет в восторге.

Л. — Я полагаю, что твоя установка его полностью удовлетворит. При хороших потенциометрах можно получить точность ориентации лучше одного градуса, что для антенны более чем достаточно.

Замкнутые системы

Н. — Одно в твоей системе меня весьма интригует. Если воспользоваться твоими определениями, то воздействующий на антенну двигатель следует назвать «восстановителем», а антенный потенциометр — «датчиком» Однако в твоей системе восстановитель связан непосредственно с датчиком, а последний подает свой сигнал на восстановитель через усилитель.

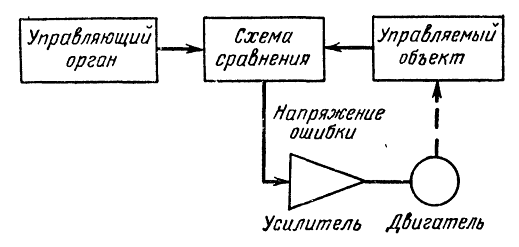


Рис. 143 Блок-схема системы автоматического регулирования (серьомеханизма), в которой двигатель стремится привести управляемый объект в такое положение, при котором напряжение ошибки было бы равно нулю.



Л. — Ты указал прямо на главную особенность устройств подобного типа Именно это воздействие восстановителя на датчик характеризует сервомеханизмы

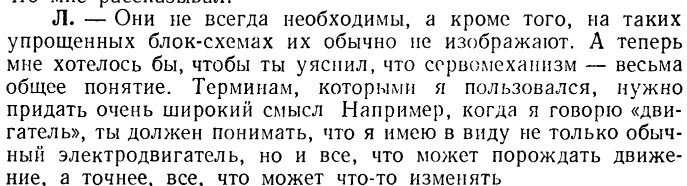
Н. — Так, значит, в сервомеханизмах в качестве датчика используются только потенциометры?

Л. — Дело не только в этом. Существует бесчисленное множество и других систем. Сервомеханизмы характеризуют не тип датчика, а общность принципа построения схемы, которую я изобразил для тебя на рис 143 Как ты видишь, здесь рядом с управляющим органом имеется компаратор, который сравнивает положение (или состояние) управляющего органа с положением (или состоянием) объекта регулирования, т. е. органа,

которым мы хотим управлять. Компаратор выявляет различие в состоянии этих органов, преобразует его в сигнал ошибки, который подает на усилитель. Выходное напряжение усилителя воздействует на двигатель, который стремится привести объект регулирования в положение, как можно более близкое к положению управляющего органа

Н. — При всем моем предубеждении к блок-схемам приведенная на рис. 143 схема представляется мне довольно понятной. В системе управления антенной роль управляющего органа выполняет потенциометр, который будет поворачивать рука моего приятеля, а в качестве объекта регулирования выступает антенна (поэтому потенциометр антенны служит датчиком положения). Разность потенциалов между двумя движками — не что иное, как сигнал ошибки, который мы подаем на усилитель. Однако на блок-схеме, приведенной на рис. 143, ты не изобразил системы демпфирования, о которой ты только что мне рассказывал.





Л. — Они не всегда необходимы, а кроме того, на таких упрощенных блок-схемах их обычно не изображают. А теперь мне хотелось бы, чтобы ты уяснил, что сервомеханизм — весьма общее понятие. Терминам, которыми я пользовался, нужно придать очень широкий смысл Например, когда я говорю «двигатель», ты должен понимать, что я имею в виду не только обычный электродвигатель, но и все, что может порождать движение, а точнее, все, что может что-то изменять

Н. — Для большей ясности я предпочел бы получить конкретный пример такого нематериального двигателя.

Пример системы автоматического регулирования

Л. — В этом случае я могу назвать тебе «моноформер». Так называют аппарат, в котором пятно на экране электроннолучевой трубки можно заставить прийти точно в то место, где расположенная снаружи картонная заслонка или маска наполовину его закрывает. Такой результат можно достичь в аппарате, принцип действия которого в виде схемы изображен на рис. 144. Усилитель получает напряжение от фотоэлемента *Ф*, а его выходное напряжение, подаваемое на систему вертикального отклонения электроннолучевой трубки, стремится отклонить луч вниз, если фотоэлемент освещен...

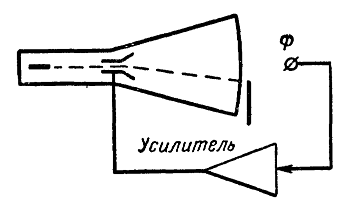
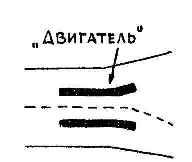


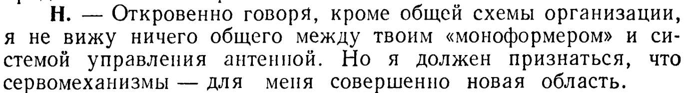
Рис. 144. Пример системы автоматического регулирования. Фотоэлемент *Ф* получает больше или меньше света с экрана электроннолучевой трубки в зависимости от того, насколько пятно электронного луча перекрывается расположенной перед экраном картонной заслонкой; фотоэлемент управляет положением электронного луча

Н. — Понял! Когда электронный луч находится в открытой зоне экрана, он освещает фотоэлемент, что порождает на выходе усилителя соответствующее напряжение. Следовательно, луч будет отклоняться вниз до тех пор, пока создаваемое им пятно не окажется наполовину скрытым заслонкой, потому что, если луч опустится ниже, усилитель не даст выходного напряжения и луч будет стремиться вновь подняться вверх.



Л. — Ты совершенно правильно понял. Как ты видишь, в этом случае роль «двигателя» выполняет отклоняющее действие, которое оказывает на электронный луч выходное напряжение усилителя. Управляющим органом служит картонная заслонка, а компаратор здесь не что иное, как оптический закон, гласящий, что свет распространяется по прямой линии, ибо когда пятно на экране электроннолучевой трубки будет ниже картонной заслонки, фотоэлемент не будет освещен, а когда оно будет выше картонной заслонки, на фотоэлемент попадет свет. Как ты видишь, терминам схемы рис. 143 необходимо придавать очень широкий смысл.

Н. — Откровенно говоря, кроме общей схемы организации, я не вижу ничего общего между твоим «моноформером» и системой управления антенной. Но я должен признаться, что сервомеханизмы — для меня совершенно новая область.



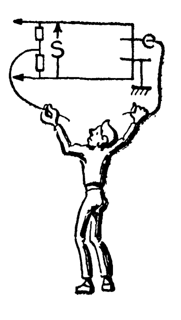
Усилитель с отрицательной обратной связью — тип системы автоматического регулирования



Л. — На самом деле, не такая уж новая. Ты, вероятно, сам того не подозревая, уже делал сервомеханизмы или, правильнее сказать, системы автоматического регулирования (это понятие шире предыдущего). Я твердо убежден, что ты уже собирал усилители низкой частоты с отрицательной обратной связью.

Н. — Разумеется, как и любой другой радиолюбитель. Но я не вижу здесь ничего общего с сервомеханизмом. Впрочем, должен сказать, что при сборке усилителя я как дисциплинированный солдат строго выполнял приложенные к схеме инструкции. Я прочитал, что в данном усилителе, добавив один резистор в этом месте и еще один в том, можно существенно улучшить качество звучания за счет некоторой потери усиления, что совершенно не страшно, если первоначальная схема обладает избыточным усилением. Я попробовал, результаты оказались очень хорошие, но должен признаться, что я до сих пор не совсем понимаю почему.

Л. — Если ты повнимательнее присмотришься к добавленным в схему усилителя резисторам, то поймешь, что они имеют целью подать на вход определенную часть выходного напряжения. Для создания такой обратной связи можно, например, снять напряжение со вторичной обмотки трансформатора и, взяв с помощью делителя из резисторов десятую часть этого напряжения, подать ее на катод первой лампы или на эмиттер первого транзистора.



Н. — Именно так я и делал свою схему лампового усилителя, но у меня не было впечатления, что при этом что-то вычитается из выходного напряжения.

Л. — Но именно вычитание и происходит, когда ты подаешь напряжение на катод лампы Это подключение дает такой же результат, как если бы это напряжение с обратным знаком подать на сетку, так как в лампах имеет значение только разность потенциалов между сеткой и катодом. А теперь сравни блок-схему на рис. 143 со схемой, которую я вычертил для тебя на рис. 145. Как ты видишь, входное напряжение представляет собой не что иное, как разность между истинным входным напряжением $U_{вх}$ и частью выходного напряжения $\beta U_{вых}$. Часть выходного напряжения $U_{вых}$ поступает на вход через ат-

тенюатор с коэффициентом передачи β (меньше единицы) Полученное напряжение $\beta U_{вых}$ с аттенюатора поступает на один вход «разностной схемы», а на другой вход этой схемы подается входное напряжение $U_{вх}$.

Н. — Ты мне уже рассказывал о схеме ИЛИ, о схеме И, но я пока еще ничего не слышал о «разностной схеме».

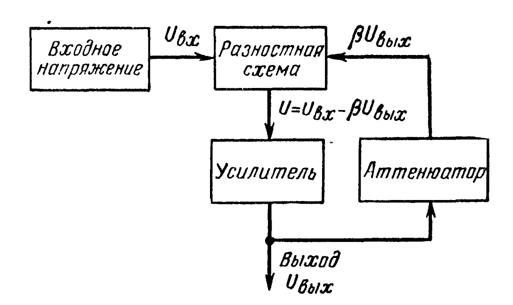


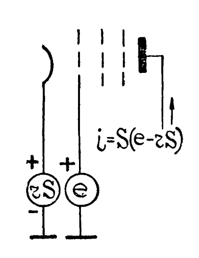
Рис. 145. Отрицательная обратная связь в усилителе осуществляется путем вычитания из входного напряжения части выходного напряжения. Такой усилитель представляет собой систему автоматического регулирования.

Л. — Эта схема не относится к категории логических. Ее можно сделать, например, на одной лампе, на сетку которой подается напряжение $U_{вх}$, а на катод — напряжение $\beta U_{вых}$; анодным током лампы управляет разность этих напряжений $U = U_{вх} - \beta U_{вых}$.

Н. — Теперь я достаточно хорошо разобрался в твоей схеме, но я совершенно не понимаю, какую пользу она может нам дать.

Польза отрицательной обратной связи

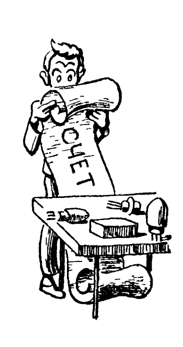
Л. — Сейчас ты увидишь. Представь себе, что усилитель имеет очень высокий коэффициент усиления (т. е. отношение $U_{вых}/U$). Значит, для получения выходного напряжения $U_{вых}$ достаточно подать на вход чрезвычайно малое напряжение U. Следовательно, можно сказать, что напряжение U, представляющее собой разность между входным напряжением $U_{вх}$ и напряжением $\beta U_{вых}$, практически ничтожно мало по сравнению с каждой из этих величин. Это означает, что эти величины равны или почти равны одна другой, т е. можно сказать, что практически $U_{вх} = \beta U_{вых}$ Возьмем для наглядности числовой пример, Предположим, что исходный коэффициент усиления нашего усилителя 10 000, значит, для получения выходного напряжения 10 *в* на входе необходимо иметь напряжение 1 *мв*. Предположим, что аттенюатор ослабляет сигнал в 50 раз, иначе говоря, что его коэффициент передачи $\beta = 0{,}02$. По этим данным можно рассчитывать, что при выходном напряжении $U_{вых} = 10$ *в* напряжение $\beta U_{вых}$ равно 200 *мв* Для получения $U = 1$ *мв* необходимо иметь входное напряжение $U_{вх} = 201$ *мв*, тогда разность между $U_{вх}$ и $\beta U_{вых}$ составит 1 *мв*.



Н. — Я легко понял твои объяснения, но до сих пор вся «выгода» от твоей отрицательной обратной связи свелась к необходимости иметь входное напряжение в 201 раз больше, чем

при непосредственной подаче на вход усилителя. Может быть в этом и есть определенный смысл, но должен признаться, что я его не вижу.

Л. — Ты отчасти прав. В самом деле, при использовании отрицательной обратной связи требуется повышенное входное напряжение, но этот недостаток существенного значения не имеет, так как всегда можно повысить первоначальное усиление. Но ты очень скоро обнаружишь преимущества этой системы. Назови, пожалуйста, Незнайкин, основные недостатки усилителя.



Н. — Прежде всего, на мой взгляд, следует сказать, что он обходится дорого, а собирать его очень скучно.

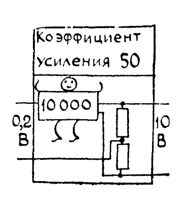
Л. — Задавая свой вопрос, я имел в виду не эти недостатки, а несовершенства электрической схемы.

Н. — Тогда, я полагаю, что ты намекаешь на вносимые усилителем искажения и на то, что его полоса пропускания не так широка, как хотелось бы, иначе говоря, на то, что иногда усилитель пропускает очень высокие и очень низкие частоты не так хорошо, как средние.

Л. — Ты совершенно правильно сформулировал мою мысль. Если вдуматься, то несомненно заметишь, что оба эти недостатка возникают вследствие изменения коэффициента усиления. Плохая передача слишком высоких или слишком низких частот определяется изменением усиления в зависимости от частоты. Если бы усиление изменялось в зависимости от амплитуды, то возникали бы нелинейные искажения.

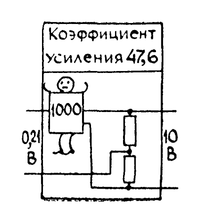


А теперь посмотри изображенную на рис. 145 схему: новый коэффициент усиления очень близок к 50 (10 *в* на выходе при 201 *мв* на входе). Представь себе, что в силу каких-то причин коэффициент усиления усилителя снизился в 10 раз. Тогда для получения на выходе 10 *в* на вход нужно подать уже не 1 *мв*, а 10 *мв*. Но в этом случае напряжение $\beta U_{вых}$ останется как и раньше 200 *мв*. В этих условиях для получения $U = 10$ *мв* необходимо увеличить напряжение $U_{вх}$ с 201 до 210 *мв*. Иначе говоря, новый коэффициент усиления всего устройства теперь будет не 50, а 10/0,21 = 47,6, что соответствует снижению по сравнению с первоначальной величиной примерно на 4,2%. Как ты видишь, при очень большом изменении коэффициента усиления усилителя коэффициент усиления всего устройства изменился незначительно. Следовательно, наша схема позволила сделать коэффициент усиления весьма стабильным.



Коэффициент усиления равен обратной величине коэффициента ослабления

Н. — Но коэффициент усиления будет стабильным только при условии сохранения на неизменном уровне ослабления сигнала, вносимого аттенюатором.

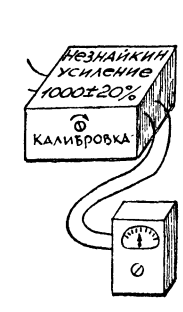


Л. — Очень хорошее замечание. Но не забывай, что получить в высшей степени стабильное ослабление совсем нетрудно. Такую задачу можно, например, выполнить с помощью делителя напряжения на резисторах, введя в него в случае надобности небольшие конденсаторы для компенсации вредного воздействия паразитных емкостей. Очень легко сделать аттенюатор, делящий напряжение в 50 раз в очень широкой полосе частот и при сильно изменяющихся значениях входного напряжения. Иначе говоря, теперь коэффициент усиления всего устройства $U_{вых}/U_{вх}$ равен величине, обратной коэффициенту

ослабления аттенюатора, т. е. $1/\beta$. Таким образом, нам удалось сделать коэффициент усиления исключительно стабильным[1].

Н. — Я пришел в восторг от знакомства с этой системой. Ты только что дал решение одной проблемы, с которой мне недавно пришлось столкнуться. Я захотел сделать усилитель с коэффициентом усиления 1000, чтобы превратить свой вольтметр в милливольтметр. Такой усилитель я сделал, но мне очень мешало значительное изменение коэффициента усиления из-за колебаний напряжения сети или старения ламп.

Л. — В самом деле это идеальное решение для создания усилителя для измерительной аппаратуры. Как видишь, Незнайкин, введение отрицательной обратной связи позволило превратить обычный усилитель в точный измерительный прибор. Необходимо сказать, что, если мы научились делать усилители с очень высоким коэффициентом усиления, то значительно труднее, не прибегая к отрицательной обратной связи, получить коэффициент усиления, укладывающийся в заданные пределы, когда нижняя и верхняя границы очень близки одна к другой. Очень часто от выполнения такой задачи отказываются и ограничиваются тем, что делают коэффициент усиления выше некоторого минимума, что в принципе весьма просто. А теперь мне остается добавить, что отрицательная обратная связь вносит в схему и другие улучшения. Она снижает паразитные шумы усилителя, и в частности, свист, создаваемый плохо отфильтрованным напряжением питания.



Н. — Превосходно, но я не понимаю, каким образом ей это удается.

Л. — Дело в том, что этот паразитный шум дает нам некоторое напряжение, которое накладывается на выходное напряжение $U_{вых}$, как если бы источник паразитного напряжения включили последовательно выходу усилителя; аттенюатор передает на вход разностной схемы часть этого паразитного напряжения, откуда она попадает на вход усилителя, благодаря чему в выходном напряжении усилителя появляется своеобразная составляющая, которая противодействует этому паразитному напряжению и значительно его ослабляет. Я не стану тебе показывать расчеты вносимого улучшения (кстати сказать, они очень простые), а посоветую только запомнить, что в итоге паразитное напряжение оказывается разделенным на некоторую величину βk, которую называют *коэффициентом отрицательной обратной связи*. В нашем числовом примере этот коэффициент равен 200 *.

Н. — Чудесно! Значит, если усилитель ужасно свистит, его можно полностью успокоить отрицательной обратной связью?

Л. — Совершенно верно. Но на этом приятные для тебя сюрпризы не заканчиваются. Воздействие отрицательной обратной связи проявляется еще в снижении выходного сопротивления. Если нагрузка потребляет некоторый ток на выходе усилителя, то напряжение $U_{вых}$ проявляет тенденцию к снижению из-за наличия в усилителе выходного внутреннего сопротивления. Это снижение в известной мере напоминает паразитное напряжение вроде напряжения свиста, о котором мы только что говорили. Отрицательная обратная связь оказывает противодействие этому снижению и значительно его

---

[1] Это следует из соотношения $U_{вх} \approx \beta U_{вых}$ или $U_{вых}/U_{вх} \approx 1/\beta$. (*Прим. ред.*).

* $k = \frac{U_{вых}}{U}$, что в указанном примере составляет 10 000, следовательно, $\beta_к = 0{,}02 \cdot 10^4 = 200$. (*Прим. ред.*).

уменьшает. В результате этого выходное внутреннее сопротивление усилителя оказывается разделенным на тот же самый коэффициент βk. Можно также доказать, что отрицательная обратная связь сильно повышает входное сопротивление этого усилителя — оно умножается на коэффициент βk.

Н. — Изумительно! Эта отрицательная обратная связь все устраивает к лучшему!

Проблемы стабильности

Л. — Действительно, она многое устраивает весьма удачно. Однако, применяя отрицательную обратную связь, необходимо проявлять определенную осторожность. Вырабатываемое нашим усилителем выходное напряжение $U_{вых}$ в принципе находится в фазе с напряжением U. На высоких частотах может произойти определенный сдвиг фазы, и если различие в фазе между выходным и входным напряжением достигнет 180°, отрицательная обратная связь превратится в положительную. Тогда взамен

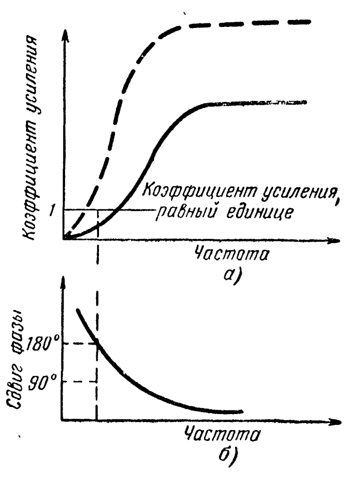


Рис. 146. На низких частотах усиление усилителя снижается (*а*), а сдвиг фазы увеличивается (*б*). На определенной частоте сдвиг фазы достигает 180°. Если на этой частоте коэффициент усиления меньше единицы (сплошная линия), то обратная связь не приводит к самовозбуждению. Если при повышении коэффициента усиления (пунктирная линия) он оказывается больше единицы на частотах, где произошел сдвиг фазы на 180°, то схема начинает генерировать.

положительных качеств отрицательной обратной связи мы получим все недостатки положительной, правда, эти недостатки сопровождаются увеличением коэффициента усиления, но это может принести пользу, если усиление на частотах, где сдвиг фазы достиг 180°, не очень большое. В противном случае устройство начинает генерировать. Чем выше коэффициент отрицательной обратной связи мы хотим получить, тем больше внимания следует уделить проблеме сдвига фазы.

Н. — Это напоминает мне одно происшедшее со мной неприятное приключение. Однажды я сделал усилитель с отрицательной обратной связью, который прекрасно работал до тех пор, пока я не заменил в нем одну из ламп на аналогичную, но имевшую слишком большой коэффициент усиления, — усилитель сбесился и очень странно зашумел наподобие корабельного двигателя.

Л. — На этот раз генерирование произошло на очень низких частотах. Твой усилитель несомненно не является усилителем постоянного тока, и поэтому на очень низких частотах произошел сдвиг фазы между выходным и входным напряжениями (рис. 146, *б*). При первоначальном умеренном усилении

(сплошная линия на рис. 146, *а*) ты не мог услышать колебаний во всей полосе частот. При увеличении усиления (пунктирная линия на рис. 146, *а*) ты увеличил коэффициент отрицательной обратной связи и превысил предел, на котором происходит самовозбуждение усилителя.

Н. — По-видимому, так и было, а я никак не мог понять, почему мой усилитель плохо пропускал низкие частоты.

Л. — Отчасти это верно, хотя проблема в основном заключается не в усилении, а в сдвиге фазы. Этот сдвиг порождается переходными цепочками связи *RC*, соединяющими анод одной лампы с сеткой следующей.

Н. — В этом случае я мог исправить положение, увеличив емкость всех этих конденсаторов.

Л. — Я внес бы небольшое исправление в твой метод, а именно, следовало бы увеличить емкость всех конденсаторов за исключением одного. Доказательство этого положения потребовало бы очень сложных расчетов, но ты можешь понять его значение, если я тебе скажу, что максимальный сдвиг фазы, который может внести одна цепочка связи *RC*, достигает 90°. Кроме того, цепочка связи ослабляет сигнал, и это ослабление увеличивается со снижением частоты. Если при неизбежном ослаблении можно снизить частоту так, чтобы другие цепочки связи не внесли значительного сдвига фазы, следует на частотах, на которых общий сдвиг фазы достиг 180°, уменьшить коэффициент усиления усилителя ниже критической величины, на которой возникает самовозбуждение.

Н. — О, это чрезвычайно сложно! Здесь, как и в истории с фазами, сложность становится ужасной.

Л. — Ты в известной мере прав. Проблемы, связанные с фазами, часто оказываются весьма трудными, что осложняется еще и тем, что многие еще не привыкли их решать.

Н. — Теперь я начинаю понимать аналогию между сервомеханизмами и усилителями с отрицательной обратной связью. Можно сказать, что предложенная тобой для вращения антенны система, как опытный лоцман, приводит ее к такому состоянию, когда разность потенциалов движков потенциометров станет равной нулю. А твой усилитель (рис. 145) также «управляет» своим выходным напряжением до тех пор, пока разность между напряжением $U_{вх}$ и 1/50 выходного напряжения не станет практически равна нулю или, вернее сказать, не будет соответствовать требованию входа усилителя.

Л. — Ты прекрасно понял, Незнайкин, должен признать, что твое прозвище тебе все меньше и меньше подходит. Сегодня ты в отличной форме!

Н. — Прошу тебя обходиться без комплиментов, я всегда такой.

Схемы, снижающие выходное сопротивление

Л. — Ну, хорошо, пользуясь предоставившимся случаем, я напомню тебе, что в рассмотренных ранее схемах мы уже встречались с отрицательной обратной связью и говорили о ее положительных качествах. Помнишь ли ты системы, которые мы использовали для снижения выходного импеданса усилителя?

Н. — Да, ты говорил мне о катодном и об эмиттерном повторителях. Я помню также странную схему, которую ты назвал «суперэмиттерный повторитель» (см. рис. 50).

Л. — В таком случае теперь ты должен понять, почему эта схема обладала интересными свойствами. Изображенная

а рис. 51 схема представляет собой двухкаскадный усилитель очень большим коэффициентом усиления, в котором непосредственная связь осуществлена благодаря использованию заимно дополняющих транзисторов *n-p-n* и *p-n-p*. Входное апряжение подается между эмиттером и базой первого транзистора, а выходное напряжение снимается с нагрузочного езистора, включенного в цепь коллектора второго транзистора, наче говоря, между коллектором этого транзистора и корпуом. Соединив эмиттер первого транзистора с коллектором второго, в схеме, приведенной на рис. 50, мы подали на этот эмиттер се выходное напряжение, которое, как и в других случаях, ычитается из входного напряжения. Здесь коэффициент β авен единице. Общий коэффициент усиления новой схемы тем лиже будет к единице, чем выше был первоначальный коэффицинт усиления усилителя, схема которого изображена на рис. 51 *. очно так же обстоит дело и с простым эмиттерным повториелем (см. рис. 49). Если нагрузочный резистор оставить включенным между эмиттером и корпусом, а входное напряжение риложить между эмиттером и базой (входное напряжение этом случае подают по двум отдельным изолированным от корпуса проводам), то ты получишь классический усилитель.

Н. — Не может быть! Ведь нагрузочный резистор включен е в цепь коллектора, а в цепь эмиттера.

Л. — Это не имеет никакого значения. Важно только одно, именно, что ток транзистора управляется напряжением, приоженным между базой и эмиттером, и что этот ток протекает о резистору, создавая на его выводах переменное напряжение. то что резистор включен не в цепь коллектора, а в цепь эмитера, существенного значения не имеет, потому что в цепях тих электродов протекают практически одинаковые токи. ак ты видишь, от этой схемы переходят к схеме эмиттерного овторителя, изображенной на рис. 49, подавая входное напряжение между базой и корпусом. В этих условиях выходное апряжение вычитается из входного и получаемая в результате азность прилагается между базой и эмиттером. Это тоже полая отрицательная связь, т. е. отрицательная обратная связь коэффицентом β, равным единице.

Н. — Теперь я понимаю, какой интерес представляют ти схемы. Совершенно ясно, что они имеют низкое выходное нутреннее сопротивление, очень стабильный коэффициент усиления и высокое входное сопротивление.



Автоматическая система регулирования скорости

Л. — Совершенно верно. А теперь для завершения нашей емы мне хотелось немного рассказать тебе об автоматической истеме регулирования скорости, т. е. о том, как заставить вигатель покорно выдерживать заданную скорость и по нашему еланию изменять ее.

Н. — Ну, это совсем несложно. Я полагаю, что в этом случае ты воспользуешься синхронным двигателем, который буешь питать переменным напряжением строго заданной частоты. азве не так?

---

* $\frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{k}{1+k}$, где k — первоначальный коэффициент силения усилителя (*Прим ред.*).

Л. — Действительно, в некоторых случаях использук такое решение. Но иногда бывает трудно сделать широкополо ный усилитель и генератор переменной частоты, способнь давать достаточную мощность для приведения в действие бол шого двигателя. Обычно предпочтение отдают двигателю постоя ного тока, снабженному датчиком скорости, например тах метрическим генератором.

Н. — А что будет делать здесь эта система демпфировани

Л. — Тахометрический генератор может служить для дем фирования в системе автоматического регулирования полож

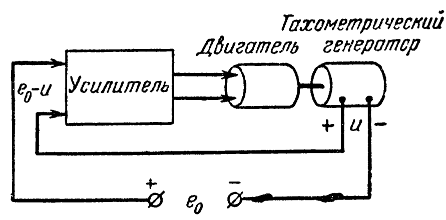


Рис. 147. Для поддержания постоянства скорости вращени двигателя на вход управляющего им усилителя подают разност между стабильным управляющим напряжением e_0 и пропорци ональным скорости напряжением u, которое выдает спаренны с двигателем тахометрический генерато

нием, как, например, для вращения антенны твоего друг но его можно использовать и иначе (рис. 147). Вырабатыва мое им напряжение u сравнивается с фиксированным упра ляющим напряжением e_0; разность этих напряжений $e_0 - u$ пода ется на вход усилителя, выходное напряжение которого управля ется двигателем. При снижении скорости двигателя управляющ им напряжение повысится, что позволит двигателю справитьс с тормозящим усилием. Таким образом осуществляется авт матическая система управления скоростью.

Для управления скоростью двигателя широко использую управляющие системы на тиратронах, о которых я тебе уж говорил; в этом случае скорость двигателя заставляют возде ствовать на фазу зажигания тиратрона. Такие системы пол чили наибольшее распространение на заводах для управлени электродвигателем различных станков: они позволяют заст вить громадный двигатель вращаться медленно, но с больши крутящим моментом или наоборот с большой, но всегда строг заданной скоростью.

Н. — Я внимательно слушал твои объяснения, но тепер мне кажется, что моя способность восприятия или, как ты г воришь, моя форма резко ухудшается. Я полагаю, что лучш перенести продолжение нашей беседы на другой день.

Беседа шестнадцатая

Успех за успехом! Незнайкин построил «электронную вычислительную машину» на потенциометрах. Принцип машины безупречен, но различные нарушающие нормальную работу факторы вносят некоторую погрешность. Любознайкин объясняет ему, как устранить эти недостатки и, ловко воспользовавшись представившимся случаем, знакомит своего молодого друга с операционными усилителями и аналоговыми вычислительными машинами. Незнайкин хотел было сразу приступить к практической реализации своих идей, но затем решил дать приобретенным за последние беседы знаниям некоторое время, чтобы они улеглись в голове; такая систематизация знаний должна выявить оставшиеся неясными вопросы, а соответствующая консультация заблаговременно устранит возможность возникновения ошибок.

Аналоговые вычислительные машины и операционные усилители

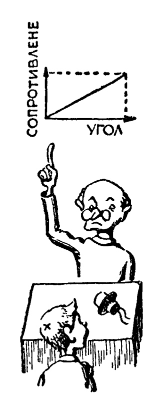
Любознайкин — А, это ты, Незнайкин! Какой гордый тебя сегодня вид. Уж не сделал ли ты какого-нибудь нового зобретения?

Незнайкин — Изобретение, мой дорогой друг, — ничто, рактическое воплощение — все. Я в самом деле горжусь элекгэнной вычислительной машиной, которую я только что заэнчил.

Л. — Ах!...

Линейные потенциометры

Н. — Но, пожалуйста, не падай в обморок. Вот с чего е это началось. Я пошел купить потенциометры для системы правления антенной моего приятеля, а купил дешево продаавшуюся по случаю небольшую партию потенциометров. Проавец сказал мне, что они отличаются исключительной линейэстью, т. е. от начала до конца дорожки сопротивление между дним из неподвижных контактов и движком строго пропорюнальны углу поворота оси.



Л. — Незнайкин, я тебя просто не узнаю, в своем, впрочем овершенно правильном, определении ты заговорил почти, как атематик. Но прости, что я перебил тебя, и продолжай.

Н. — Я захотел проверить, правду ли сказал мне продаец. На обмотку потенциометра я подал ровно 10 *в* от блока итания высокой стабильности. На ось потенциометра я надел эбольшую шкалу, которую движком разделил на десять равых частей, а между движком и неподвижным контактом, от эторого движок начинает свой путь, подключил очень хороий вольтметр. Подготовив свое устройство, я начал проверять, оответствуют ли показания вольтметра градуировке шкалы. а пятом делении, т. е. как раз на середине шкалы, я получил 5 *в*.

Л. — Поздравляю тебя, Незнайкин, ты совершенно верн начал проверку линейности потенциала. Я подозреваю, чт спустя некоторое время ты назовешь свое устройство вычисли тельной машиной.

Второй потенциометр

Н. — Дорогой Любознайкин, неужели ты мог подумать что из-за такого пустяка я отважился бы тебя побеспокоить Позволь мне закончить свой рассказ. Имея в своем распоряже нии напряжение, изменяющееся пропорционально углу пово рота оси потенциометра, я подумал, а что, если приложит это напряжение на обмотку другого линейного потенциометра но обладающего значительно большим сопротивлением, чтоб

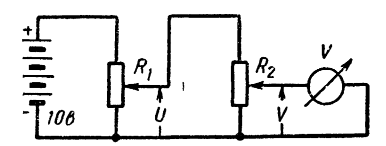


Рис. 148. «Аналоговый умно житель Незнайкина» состои из двух строго линейных по тенциометров и вольтметра

не вызывать изменений выходного напряжения первого потен циометра. Второй потенциометр я снабдил аналогичной шкалоі с делениями от 0 до 10. Вольтметр я включил между ползунком и нижним выводом второго потенциометра, как это показанс на рис. 148. На потенциометр R_2 подается напряжение U, г вольтметр измеряет напряжение V, представляющее собой произведение напряжения U на ослабление, вносимое вторым потенциометром. Я разделил шкалу вольтметра 10 *в* на 100 ча стей, полагая, что эта шкала даст мне произведение двух цифр выставленных на шкалах потенциометров. Надеюсь, ты оценишь мое устройство?



Л. — Должен признать твою удачу, Незнайкин, ты сделал аналоговый умножитель, который иногда применяется в вычислительных машинах.

Н. — Ааах, так это уже известно? А я-то уже было начал писать заявку на получение патента.

Л. — Не огорчайся, Незнайкин. Если ты и дальше будешь так быстро прогрессировать, то вскоре сможешь получать патенты. Твоя система очень остроумна, и я поздравляю тебя с тем, что ты сумел ее создать без посторонней помощи. Какое сопротивление имеют твои потенциометры?

Н. — Сопротивление потенциометра R_1 — 2 000 *ом*, а R_2 — 100 000 *ом*, а используемый вольтметр представляет собой универсальный измерительный прибор с входным сопротивлением 20 000 *ом/в*.

Л. — А насколько точно работает твое устройство?

Проблема точности

Н. — Откровенно говоря, я был несколько разочарован его точностью, особенно в тех случаях, когда движок второго потенциометра находится примерно посередине. Так, например, когда я поставил оба движка посередине шкалы (и тот и другой на деление 5), вольтметр должен был показать 25 делений (2,5 *в*).

)днако я с удивлением обнаружил, что он показывает чуть-чуть ольше 22. По-видимому, я недостаточно точно сделал шкалы.

Л. — Я знаю твою аккуратность (когда ты захочешь) в выолнении чертежей и поэтому твердо убежден, что шкалы здесь е причем. Причина кроется в чем-то другом. Позволь мне ассчитать... Правильно, здесь, верно, именно такой и должна ыть ошибка.

Н. — Так объясни, пожалуйста, в чем же дело.

Л. — Ты просто забыл учесть, что вольтметр неправильно змеряет выходное напряжение потенциометра R_2. Сопротивение потенциометра 100 000 *ом*, а вольтметр на шкале 10 *в* бладает сопротивлением 200 000 *ом*. Как ты видишь, это сопротивление совсем не бесконечно по сравнению с величиной опротивления R_2 и в результате измеряемое напряжение V казывается меньше того, которым оно было бы при использоании вольтметра с очень большим входным сопротивлением.

Н. — Значит, для этого устройства мне следовало бы доать совершенно специальный вольтметр?

Л. — Ты можешь найти выход и без такого вольтметра. ожно значительно улучшить результаты, если на место R_2 эставить потенциометр с меньшим сопротивлением. Расчеты эказывают, что наилучшим образом подходит потенциометр сопротивлением 14 000 *ом*. Хорошие результаты можно полуать уже при сопротивлении 10 000 *ом*.

Н. — Я полностью согласен, что в этом случае вольтметр равильно покажет величину выходного напряжения потениометра R_2. Но я очень боюсь, как бы это сопротивление) 000 *ом*, подключенное к потенциометру R_1, не повлияло ильно на потенциал последнего.

Преобразование Тевенина

Л. — Сейчас я покажу тебе, как рассчитать величину озникающей ошибки. Для этой цели можно воспользоваться дним весьма общим методом, который называют преобразоанием Тевенина.

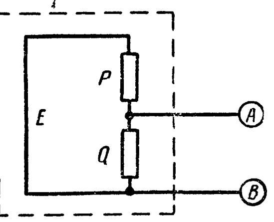


Рис. 149. Напряжение E, приложенное к делителю напряжения $P - Q$ создает некоторое напряжение между точками A и B.

Представь себе источник напяжения E, к которому подключен елитель напряжения, состоящий з резисторов P и Q (рис. 149). сли все это устройство поместить коробку, а от точек A и B сдеать выходящие наружу выводы,) полученную конструкцию можно ассматривать как эквивалент ноэго источника. Согласно преобазованию Тевенина точки A и B едут себя как выводы источника э. д. с. E' и внутренним сопроивлением r. Нам предстоит рассчиать эти две величины. Расчет E' е представляет никакой трудноти — эта величина представляет собой разность потенциалов ежду точками A и B, когда к ним снаружи коробки ничего не эдключено. Ты свободно сможешь выполнить эту задачу, если ачнешь с расчета тока, даваемого источником E.

Н. — На мой взгляд, это совсем нетрудно. Источник замкут на последовательно соединенные резисторы P и Q, следоательно, протекающий по резисторам ток равен $E/(P+Q)$.

В этих условиях протекающий по резистору Q ток вызывает падение напряжения $EQ/(P+Q)$.

Л. — Совершенно верно. Это и есть э. д. с. нашего источника (рис. 150), а внутреннее сопротивление будет...

Н. — Я предполагаю, что это будет просто-напросто сопротивление резистора P.

Л. — Ты ошибаешься, но не отчаивайся, потому что почти все делают эту ошибку. На самом деле внутреннее сопротивление нашего источника эквивалентно сопротивлению параллельно включенных резисторов P и Q, т. е. равно $PQ/(P+Q)$.

Н. — Совершенно неожиданный результат. А ведь резистор P включен последовательно между источником E и точкой A.

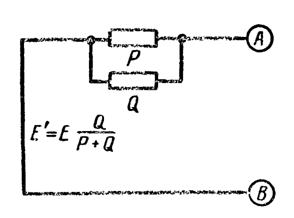


Рис. 150. Напряжение между точками A и B схемы (рис. 149) эквивалентно (по преобразованию Тевенина) напряжению источника с э. д. с. E', внутреннее сопротивление которого представляет собой параллельно соединенные резисторы P и Q (оно равно $\frac{PQ}{P+Q}$).

Л. — Я могу с помощью математики доказать тебе правильность результата.

Н. — Все, что хочешь, но только не это!

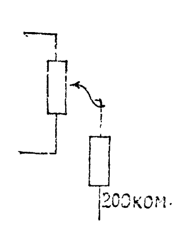
Л. — Такую реакцию я и предвидел. Резистор Q включен параллельно с тем, что ты можешь включить между точками A и B. Если его сопротивление мало по сравнению с P, то мы можем разместить между A и B резистор с сопротивлением, малым по сравнению с P, но большим по сравнению с Q. Следовательно, величина Q останется неизменной, иначе говоря, внутреннее сопротивление нашего эквивалентного источника имеет величину, значительно меньшую P.

Н. — Хорошо, я признаю твое преобразование Тевенина, но как можно применить его к нашему потенциометру R_1?

Л. — Очень просто, нужно представить себе, что источник напряжения 10 *в* и обе части обмотки потенциометра R_1, расположенные выше и ниже ползунка (см. рис. 148), заменены источником, дающим напряжение, точно соответствующее шкале потенциометра R_1. Внутреннее сопротивление этого нового источника равно сопротивлению соединенных параллельно двух участков обмотки потенциометра R_1.

Как ты видишь, когда движок потенциометра R_1 находится очень близко к одному из концов его обмотки, внутреннее сопротивление имеет очень малую величину, потому что одна из двух частей потенциометра имеет низкое сопротивление. Можно доказать, что это эквивалентное сопротивление достигает максимума, когда движок потенциометра R_1 находится посередине своей обмотки. В этот момент сопротивление каждого из участков обмотки равно половине полного сопротивления всей обмотки. При параллельном включении эквивалентное сопротивление равно одной четвертой части полного сопротивления обмотки. Иначе говоря, э. д. с. твоего эквивалентного источника, состоящего из батареи 10 *в* и потенциометра R_1, в зависимости от положения движка этого потенциометра изменяется от 0 до 10 *в*. А внутреннее сопротивление этого источника равно нулю, когда движок потенциометра находится в самом низу, проходит через максимум — 500 *ом*, когда дви-

жок достигает середины обмотки, и вновь становится равным нулю, когда движок доходит до своего крайнего верхнего положения. Следовательно, в своих расчетах мы должны исходить из того, что максимальное значение эквивалентного внутреннего сопротивления 500 *ом*. Как ты видишь, потенциометр с сопротивлением 10 000 *ом* очень мало изменит ненагруженное выходное напряжение потенциометра R_1.



Н. — Теперь-то я все понял. Потенциометр R_2 тоже нужно рассматривать как источник напряжения, эквивалентное внутреннее сопротивление которого может достигать 25 000 *ом*, когда движок этого потенциометра находится посередине своей обмотки. Естественно, что в этих условиях вольтметр с сопротивлением 200 000 *ом* при работе на шкале 10 *в* весьма сильно влияет на отдаваемое таким источником напряжение.

Л. — Верно, потери напряжения в результате такого воздействия составляют около 11%.

Цепь ошибок

Н. — Но положение представляется мне поистине драматическим: при большом сопротивлении R_2 вольтметр неправильно измерит выходное напряжение на потенциометре R_2, а при низком сопротивлении потенциометра R_2 последний изменит напряжение, снимаемое с потенциометра R_1. Иначе говоря, мы оказались в таком же безвыходном положении, как человек который хотел зарабатывать очень много (чтобы быть богатым) и в то же время очень мало (чтобы платить меньше налогов).



Л. — Противоречивость требований делает задачу весьма неприятной, но тем не менее путем соответствующего компромисса можно найти приемлемое решение. Для достижения максимального снижения вносимых ошибок следует поставить на место R_2 потенциометр сопротивлением порядка 14 000 *ом*. Однако при желании перемножать три величины с помощью трех каскадно соединенных потенциометров исключительно трудно подобрать потенциометры с возрастающими в геометрической прогрессии сопротивлениями. Поэтому в таких случаях мы воспользуемся более простым методом: между движком потенциометра R_1 и резистивной обмоткой потенциометра R_2 мы поместим усилитель, понижающий сопротивление с коэффициентом передачи как можно ближе к единице, обладающим высоким входным и низким, выходным сопротивлениями.

Н. — Я полагаю, что здесь ты используешь что-нибудь вроде эмиттерного повторителя или своего суперэмиттерного повторителя, схему которого ты изобразил для меня на рис. 50.

Операционные усилители

Л. — Совершенно верно. И раз мы уже начали говорить об аналоговой вычислительной технике, я покажу тебе, какой интерес могут представлять операционные усилители.

Н. — Вот новая категория усилителей, о которой я ничего не знаю!

Л. — О них ты знаешь значительно больше, чем думаешь. Дело в том, что так называют усилители с непосредственной связью, обладающие высоким коэффициентом усилéния, очень высоким входным сопротивлением и очень низким выходным сопротивлением. Несколько позже мы рассмотрим, как такие усилители делают.

А теперь представь себе, что мы собрали усилитель п схеме, приведенной на рис. 151. Усилитель имеет отрицател ный коэффициент передачи; иначе говоря, он дает на выхо отрицательное напряжение, когда на его вход подается пол жительное напряжение (очень небольшое, потому что коэфф циент усиления имеет очень большую величину). Можешь ты сказать, какой ток протекает по резисторам R_1 и R_2, име щим одинаковое сопротивлени

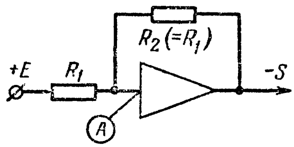


Рис. 151. Из-за глубокой отрицательной обратной связи коэффициент передачи усилителя становится равным —1 (при этом следует считать, что напряжение в точке A почти равно нулю и что входной ток усилителя тоже ничтожно мал).

Н. — Ты так подчеркив очень большую величину коэ фициента усиления, что я пре полагаю, что потенциал на вх де A следует считать равны нулю. Тогда протекающий резистору R_1 ток будет A/R а ток, протекающий по рез стору R_2 будет A/R_2.

Л. — Совершенно верно. теперь скажи, пожалуйста, ка относятся величины этих токо одна к другой.

Н. — Не имею ни малейш го представления.

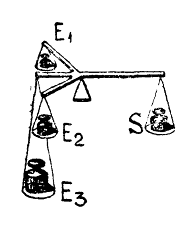
Л. — А ведь я тебе ска зал, что входное сопротивлени этого усилителя очень высокое. Следовательно, его входно ток практически равен нулю. Это означает, что протекающи по резисторам R_1 и R_2 токи равны между собой. А раз рези сторы R_1 и R_2 имеют одинаковое сопротивление, ты можеш сделать вывод, что $E = S$.

Н. — Ты изрядно потрудился, чтобы еще раз дать мн объяснение отрицательной обратной связи.

Л. — Я очень рад, что ты ее узнал. Как ты видишь, тако усилитель позволяет произвести инверсию, т. е. получить дл имеющегося напряжение, равное ему, но с обратным знаком Если в этих условиях сопротивление резистора R_2 не был равно сопротивлению резистора R_1, а было бы, например, в 5 ра больше его, то выходное напряжение стало бы в 5 раз больш входного; иначе говоря, мы можем получить удобное средств для умножения напряжения на 5.

Н. — Но все это в свое время ты мне уже объяснил, и не вижу ничего нового.

Сложение



Л. — К этому мы сейчас подойдем. А теперь рассмотри схему, приведенную на рис. 152. Токи, протекающие по тре расположенным слева резисторам, соответственно равны E_1/R E_2/R и E_3/R. Ток, протекающий по расположенному справ резистору, равен, как мы только что установили, S/R. Потен циал точки A из-за очень высокого коэффициента усилени усилителя следует, как и раньше, считать равным нулю. Из-з высокого входного сопротивления поступающий на вход уси лителя ток следует также рассматривать как равный нулю Это означает, что сумма трех поступающих в точку A токов должна быть равна выходному току. Если при написании этого равенства из всех его членов убрать знаменатель R, то мы получим $E_1 + E_2 + E_3 = S$. Таким образом мы получили напряжение, равное сумме трех напряжений.

Н. — Твоя схема очень хитрая. На мой взгляд, она несколько похожа на своеобразные весы. Если бы левое плечо коромысла состояло из трех реек равной длины и к каждой из них была подвешена чашка, то можно было бы сказать, что в висящие на тройном левом коромысле чашки мы положили равные гири E_1, E_2 и E_3 и что весы уравновешены лежащей в правой чашке гирей S, вес которой равен сумме весов гирь, лежащих в левых чашках.

Л. — Превосходная аналогия. Впрочем, можно сказать, что она применима и к схеме, изображенной на рис. 151. Потенциал точки A остается неизменным, потенциалы левого вывода резистора R_1 и правого вывода резистора R_2 изменяются пропорционально величинам сопротивления этих резисторов. Это очень напоминает движение концов рычага, у которого точкой опоры служит точка A, а плечами которого соответственно служат сопротивления резисторов R_1 и R_2.

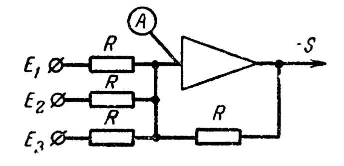
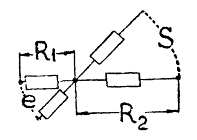


Рис. 152. Эта схема дает выходное напряжение, по абсолютной величине равное (но с противоположным знаком) сумме трех входных напряжений.

Н. — Ты дал мне метод, позволяющий сложить три напряжения...



Л. — Схемой с тремя входами я воспользовался лишь для примера. На практике же входов можно сделать столько, сколько их потребуется.

Н. — Ты меня неправильно понял. Я хотел сказать, что схема хорошо производит сложение, но меня интересует, как осуществить вычитание.

Л. — Очень просто. Для этого нужно воспользоваться схемой на рис. 151, подобрав резисторы R_1 и R_2 с одинаковым сопротивлением; в этих условиях положительному напряжению E будет соответствовать равное ему по абсолютной величине отрицательное напряжение S. «Прибавление» этого напряжения S к другим напряжениям со схемы на рис. 152 соответствует его вычитанию из напряжения E.

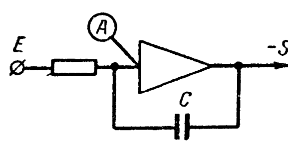


Рис. 153. Схема усилителя, работающего как интегратор.

А теперь я хотел бы услышать, что ты думаешь о схеме, изображенной на рис. 153.

Интегратор

Н. — На вид она очень простая, но я не доверяю кажущейся простоте. Я полагаю, что продолжая наши недавние рассуждения, можно считать потенциал точки A практически равным нулю. В этих условиях протекающий по резистору ток должен быть равен E/R. Однако это совершенно не соответствует действительности, так как ток не может идти на вход усилителя (входное сопротивление бесконечно велико). Ток должен идти через конденсатор, однако постоянный ток через конденсатор протекать не может.

Л. — В установившемся состоянии, разумеется, не может. Но я не вижу, что могло бы помешать в течение некоторого

времени послать постоянный ток в конденсатор, чтобы его зарядить.

Н. — Верно; об этом я почему-то не подумал. Но твой конденсатор не может зарядиться: левая обкладка конденсатора имеет нулевой потенциал, а правая соединена с выходом усилителя!

Л. — Незнайкин, твоя форма положительно ухудшилась — ведь выход усилителя не точка с постоянным потенциалом. По мере заряда конденсатора потенциал его правой обкладки будет снижаться. Как ты видишь, в каждый момент ток, заряжающий конденсатор, пропорционален напряжению *E*. Какой вывод из этого можно сделать?

Н. — Я полагаю, что если напряжение *E* поддерживать неизменным, конденсатор *C* будет заряжаться током постоянной величины, т. е. заряд конденсатора будет нарастать исключительно равномерно.

Л. — Я предпочитаю более точные выражения. Следует сказать, что конденсатор будет заряжаться по линейному закону. А что произойдет, если напряжение *E* перестанет быть неизменным?

Н. — О, получится ужасная картина. Конденсатор станет накапливать полученный ток, сложит все это вместе и создаст страшную неразбериху.

Л. — Строго говоря, он не станет складывать, а сделает значительно лучше — он будет интегрировать. Полученное устройство представляет собой почти совершенную интегрирующую схему. Как ты помнишь, в свое время мы собрали интегрирующую схему всего лишь из одного резистора и из одного конденсатора (см. рис. 70). Ту схему можно использовать только в тех случаях, когда выходное напряжение *S* мало или даже ничтожно по сравнению с входным напряжением *E*, чтобы напряжение на выводах резистора *R* можно было считать равным *E*. В приведенной же на рис. 153 схеме напряжение на выводах резистора *R* всегда строго равно *E* даже в тех случаях, когда выходное напряжение имеет значительную величину. Следовательно, это совершенная интегрирующая схема.

Н. — Когда начинают говорить об интеграторах и подобных им устройствах, меня охватывает довольно сильное чувство беспокойства. Я думаю, что эта схема никогда не ходит одна. Когда я слышу об интегрирующей схеме, я полагаю, что и дифференцирующая находится где-то недалеко.

Л. — И ты прав. Дифференцирующую схему можно получить, если в схеме на рис. 153 поменять местами резистор и конденсатор. Как ты видишь, с помощью операционных усилителей мы можем производить умножения на постоянную величину, сложения, вычитания, а также можем интегрировать и дифференцировать.

Аналоговый умножитель

Н. — Да, но мне еще кое-чего не хватает. Если ты намерен в качестве исходных данных всегда использовать напряжение, то я не представляю себе, как можно одно напряжение умножить на другое. В «схеме Незнайкина» (рис. 148) используются не напряжения, а положения осей потенциометров.

Л. — В случае надобности мы можем использовать схему, которую ты с присущей тебе скромностью называешь «схемой Незнайкина». Для этого потребуется установить два сервомеханизма и с их помощью заставить умножаемые напряжения

управлять движками потенциометров. Но имеются и другие методы и, в частности, метод, основанный на использовании эффекта Холла.

Н. — Этим эффектом ты называешь эхо, которое мы слышим в больших холлах или на вокзалах?

Л. — Незнайкин, будь, пожалуйста, посерьезнее. Эффект Холла заключается в появлении разности потенциалов между точками пластины из полупроводника, через которую проходит ток перпендикулярно направлению магнитного поля, как это показано на рис. 154. Ток протекает по пластине направо, а магнитное поле H направлено сверху вниз. В этих условиях между точками A и B появляется разность потенциалов, которая пропорциональна протекающему по пластине току и напряженности магнитного поля. Если магнитное поле создается катушкой, по которой протекает ток I_1, а по пластине проходит ток I_2, то разность потенциалов между точками A и B пропорциональна произведению I_1I_2. Таким образом можно создать аналоговый умножитель.

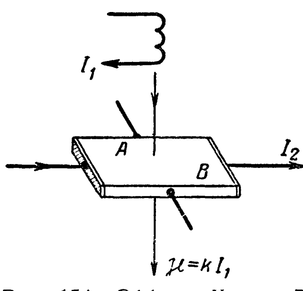


Рис. 154. Эффект Холла. В пластине из полупроводника, помещенной в магнитное поле H, при прохождении по ней электрического тока I_2 между точками A и B появляется разность потенциалов, пропорциональная I_2 и H.



Область применения аналоговой вычислительной техники

Н. — Это представляется мне довольно ясным, но я плохо понимаю прилагательное «аналоговый», которое ты уже несколько раз произнес.

Л. — Этим эпитетом обозначают целый класс вычислительных машин, оперирующих с непрерывно изменяющимися электрическими величинами. Эти величины представляют собой электрическую аналогию используемых в расчетах самых различных по своей природе величин. Например, если на вход изображенной на рис. 153 интегрирующей схемы подать напряжение, отображающее скорость двигающегося предмета, то выходное напряжение представит собой электрическую аналогию пройденного этим предметом пути. Как ты видишь, используемый здесь метод коренным образом отличается от метода, который мы использовали в расчетах по двоичной системе счисления. Цифровые вычислительные машины используют числа и производят с ними арифметические операции; каждое из этих чисел может изменяться только скачкообразно и представляет собой не аналоговый эквивалент явления, а численное выражение этого явления.

Н. — Я хорошо понял различие. Аналоговые машины представляются мне значительно более простыми и более симпатичными, чем цифровые. Устройство аналоговых машин понять намного легче.

Л. — Отчасти это верно. Но необходимо отметить, что аналоговые машины значительно уступают цифровым по точности производимых вычислений: получить 1% довольно легко, а пе-

решагнуть 0,1% очень сложно. Иначе говоря, аналоговую технику можно рекомендовать в тех случаях, когда особой точности не требуется.

Устройство аналоговых вычислительных машин внешне проще, но не забывай, что создать операционный усилитель довольно сложно, так как в дополнение к исключительно высокому коэффициенту усиления (часто выше 100 000) он должен обладать еще целым рядом качеств, которые я тебе уже назвал.

Создание операционных усилителей

Н. — А как достигают такого результата?

Л. — Обычно используют один из модуляторов, отрезающих все или ничего, о которых я тебе уже говорил. Вместо механического модулятора чаще ставят модулятор на транзисторах или систему на фоторезисторах (резисторах, омическое сопротивление которых зависит от освещенности). Такие устройства могут иметь очень ограниченную полосу пропускания, что оказалось бы существенным препятствием для использования глубокой отрицательной обратной связи. Для предотвращения такой опасности используют довольно сложную схему, именуемую схемой Гольдберга, в которой переменную составляющую входного напряжения подают в заданную точку усилителя, а постоянную составляющую передают через предварительный усилитель, снабженный модулятором и детектором. Все это устройство достаточно сложно, но оно практически является наилучшим решением, способным обеспечить очень высокий коэффициент усиления, хорошую стабильность и дать возможность применять очень глубокую отрицательную обратную связь. Не забывай, что в приведенной на рис. 151 схеме при $R_1 = R_2$ я устанавливаю коэффициент отрицательной обратной связи, равный коэффициенту усиления усилителя, а я тебе уже говорил, что он может быть порядка 100 000.

Н. — Теперь я понял, почему ты всегда говорил, что потенциал входа *A* следует считать ничтожно малым. Но я также понял, что эти операционные усилители ужасно сложны и, по-видимому, очень дороги.

Л. — И ты не ошибся, Незнайкин. Эти усилители в самом деле очень дороги, а в большой аналоговой вычислительной машине их может быть очень много.

Использование аналоговых вычислительных машин

Н. — Я не очень хорошо понимаю, почему их столько нужно. Не можешь ли ты на примере объяснить мне возможности аналоговых вычислительных машин?

Л. — Как ты знаешь, в механике существуют качающиеся системы. Всякое обладающее массой тело, удерживаемое в каком-либо определенном положении пружиной, воздействующей на него с силой, пропорциональной расстоянию между положением тела и собственным положением покоя, начинает качаться, если его силой сдвинуть с занимаемого им положения. В одной машине может быть несколько таких систем. Так, например, когда ты одним колесом своей микролигражки въезжаешь на тротуар, смещение колеса вверх передает определенный импульс на колеса. На самом колесе имеется амортизированная качающаяся система, которую ты называешь бара-



баном. Колесо соединяется с корпусом автомобиля подвеской, которая служит второй качающейся системой. Толчок, вызываемый въездом на тротуар, смягчается эластичным устройством — шиной. С помощью схем, состоящих из конденсаторов и катушек, мы можем имитировать качающиеся системы, а их механические амортизаторы можно имитировать последовательно включенными резисторами; таким образом, мы создадим электрические аналоги наших механических систем. Для имитирования въезда на тротуар мы подадим соответствующий электрический импульс на всю совокупность используемых схем, которая представляет автомобиль (а вернее, его поведение).

Н. — Это в самом деле очень хорошо. Таким образом мы устраняем риск повреждения шины.

Вычисления в «нереальном времени»

Л. — Это не единственное положительное качество. При имитировании мы можем изменять масштаб времени [1]. Электрическое явление в точности соответствует поведению механической системы (например, напряжение на определенном электроде воспроизведет движение автомобиля во времени), но происходит оно в другом масштабе времени. Или, как говорят кинорежиссеры, совсем не обязательно работать в «реальном времени». Поэтому мы, например, можем сделать так, что электрические процессы будут протекать медленнее воспроизводимого ими явления, что облегчит запись выходного напряжения.

В других же случаях может понадобиться, наоборот, ускорить эволюцию электрического эквивалента изучаемого явления.

Н. — В этом я не вижу никакой пользы, ведь намного интереснее получить возможность внимательно, не торопясь, проследить за ходом развития явления.

Л. — Да, если это очень быстрое явление. Но может понадобиться исследовать и какую-либо очень медленную эволюцию. Как, например, проследить за работой большого парового котла, питающего турбину. Изменение огня в топке из-за значительной тепловой инерции котла скажется на давлении пара только через значительное время. Поэтому очень интересно создать аналоговую модель котла и турбины, позволяющую в любой момент узнать, как будет реагировать вся установка на уменьшение или увеличение подачи угля на одну лопату. Проводя такой ускоренный предварительный анализ поведения установки, мы получаем возможность расходовать топливо с максимальной рентабельностью.

Н. — По сути дела, это современный вариант хрустального шара колдунов — с помощью своего метода ты прекрасно предсказываешь будущее!

Л. — Ты преувеличиваешь — я могу «предсказать будущее» лишь в той мере, в какой оно строго подчиняется простым математическим законам. Только в этом случае имеется возможность экстраполировать во времени последствия относительно ограниченного действия.

Н. — До того момента, когда все электронные автоматы восстанут против своих творцов.

Л. — Я попрошу тебя! Пожалуйста, не заимствуй дурной напыщенный стиль у бульварной прессы! Не забывай, что ни

---

[1] Имитирование явления или процесса обычно называют моделированием. (*Прим. ред*)

одна электронная машина никогда не даст тебе того, что ты в нее не вводил. Она также не может восстать или попытаться проглотить своего конструктора, как автомобиль, в котором никого нет, не может сам броситься в погоню за своим водителем. Успокойся, Незнайкин, мы ознакомились со многими вопросами электроники, а в этой науке мне больше всего нравятся ее удивительные возможности помочь человеку. Электроника обеспечит прогресс техники, который сегодня нельзя даже представить себе, но который в значительной мере пойдет на благо человечеству.

Н. — Если ты перешел к таким большим обобщениям, я должен сделать вывод, что мы закончили свою беседу.

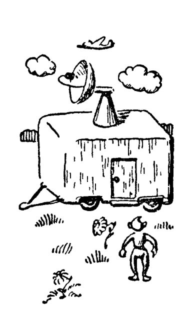
Л. — Нам еще предстоит об очень многом поговорить. Я предлагаю тебе, Незнайкин, подумать пару недель, а затем вновь придти ко мне, чтобы разом и в любом порядке задать мне вопросы по всем темам, которые кажутся тебе наиболее сложными. Я надеюсь, что таких вопросов окажется не очень много и мы быстро покончим со всем, что осталось неясным.

■

Беседа семнадцатая

У Незнайкина масса вопросов. Почти все они возникли во время экскурсии на радиолокационную станцию и при чтении ее технического описания. С помощью Любознайкина он знакомится с техникой сверхвысоких частот: с магнетронами, клистронами, коаксиальным кабелем, радиолокационным антенным переключателем передача—прием, стабилизаторами напряжения питания и системой передачи угла поворота с помощью сельсинов. Полностью отдавшись увлечению, Незнайкин строит грандиозные планы, показывая тем самым, что в электронике для него не осталось никаких секретов.

Путешествие вокруг радиолокатора



Любознайкин — Ну как, Незнайкин, много ли ты набрал вопросов, которые ты хочешь мне задать?

Незнайкин — Великое множество, но я думаю, что на многие из них я мог бы и сам найти ответ. Я отобрал лишь некоторые вопросы, которые возникли у меня на прошлой неделе, когда я совершил экскурсию на радиолокационную станцию. Для начала попрошу тебя объяснить мне, как работает магнетрон.

Двуханодный магнетрон

Л. — Хорошо, начнем с двуханодного магнетрона. Его аноды представляют собой половинки цилиндров, расположенные так, что образуют подобие трубки, внутри которой размещен подогревный катод. Вся эта конструкция находится в междуполюсном зазоре мощного магнита, силовые линии которого параллельны оси цилиндра. Схема включения двуханодного магнетрона изображена на рис. 155, аноды соединены с выводами колебательного контура. Положительный полюс источника высокого напряжения соединен со средней точкой контура, а отрицательный — с катодом магнетрона. Само собой разумеется, что все элементы магнетрона — его катод и аноды — помещены в колбу, из которой откачан воздух. Представь себе, что из-за небольшого рассогласования один из анодов в какой-то момент имеет потенциал чуть выше, чем другой.

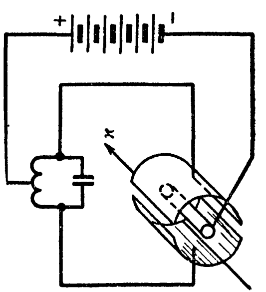


Рис. 155. Первый тип магнетрона — двуханодный магнетрон, помещается в магнитное поле, параллельное оси его катода.

Н. — Разве такое положение возможно? Ведь аноды соединены между собой колебательным контуром.

Л. — В контуре вполне возможно возникновение небольших колебаний, которые создадут на мгновение разность потен-

циалов между его выводами. Как поведут себя в этом случае выходящие с катода электроны?

Н. — О! Здесь нет никакой проблемы. Большинство электронов пойдет к тому из анодов, который имеет более высокий потенциал.

Л. — В этом-то направлении электронов пойдет меньше, чем в другом. Не забывай о наличии магнитного поля — оно стремится закрутить траекторию движения электронов вокруг катода. Поэтому из-за отклонения траектории большое число электронов, двигавшихся в сторону более положительного анода, попадет на менее положительный анод.

Н. — Эти электроны форменные идиоты!

Л. — Ничего подобного! Эти электроны стремятся усилить первоначальный разбаланс. Они повышают разность потенциалов между двумя анодами до тех пор, пока колебательный контур не начнет изменять эту разность в другую сторону. Следовательно, колебания будут поддерживаться действием электронов и магнитным полем.

Н. — Очень ловко! Но по сути дела твой магнетрон не что иное, как диод с двумя анодами.

Многоанодный магнетрон

Л. — Совершенно верно. Но обычно магнетроны делают не с двумя, а с большим количеством анодов, например с восемью или десятью. Их можно расположить по схеме, приведенной на рис. 156. Колебания создаются точно так, как показано на рис 155; разница заключается лишь в том, что в этом случае делают восемь одновременно работающих связанных колебательных контуров. В какой-то определенный момент четные аноды положительны относительно нечетных, а в следующий полупериод — наоборот.

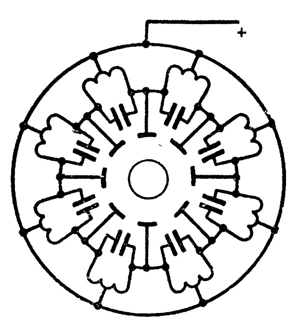


Рис. 156. Многорезонаторный магнетрон с восемью анодами, соединенными колебательными контурами.

Н. — Я понимаю принцип работы, но, на мой взгляд, сделать такую восьмианодную систему с восемью колебательными контурами дьявольски сложно!

Л. — Намного проще, чем ты думаешь, Незнайкин. Все эти колебательные контуры и аноды сделаны из одного куска меди, которому придана форма, показанная на рис. 157 Весь этот медный блок соединяется с положительным полюсом источника высокого напряжения. Как ты видишь, чтобы пройти от одного анода к другому, ток должен обогнуть полости, что дает нам эквивалент одновитковой катушки.

Н. — С катушкой все ясно, но я совсем не вижу конденсатора.

Л. — Но в этом повинны твои глаза; между двумя поверхностями щели, соединяющей околокатодное пространство с одной из полостей, имеется некоторая емкость.

Н. — Ты прав. Принимая во внимание очень малую индуктивность и очень малую емкость, я полагаю, что система должна создавать колебания очень высокой частоты.

Л. — Такие магнетроны легко позволяют получить колебания с частотой выше 30 000 *Мгц*, иначе говоря, выше 30 миллиардов периодов в секунду. Такая частота соответствует длине волны меньше одного сантиметра. Но в современных радиолокаторах магнетроны чаще используют для получения колебаний с частотой 3 *Ггц* (т. е. 3 000 *Мгц*), что соответствует

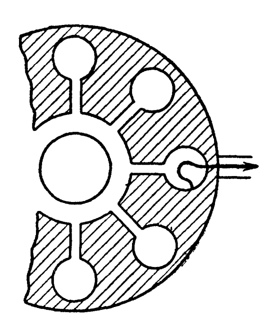


Рис. 157. Реальная конструкция восьмикамерного магнетрона; колебательными контурами являются объемные резонаторы, полученные фрезерованием анодного блока. В одном из объемных резонаторов находится петля — виток связи, предназначенный для вывода энергии.

длине волны 10 *см* или же 10 *Ггц* (длина волны 3 *см*). Обычно в радиолокаторах питание от источника довольно высокого напряжения подается на магнетроны на очень короткое время (одна микросекунда или еще меньше), что позволяет получить очень высокую мгновенную мощность.

Н. — А как выводят эту мощность из магнетрона?

Л. — Очень просто. В одну из полостей помещают петлю связи, которая служит вторичной обмоткой трансформатора, к ней подключают коаксиальный кабель, через который и отводят энергию.

Коаксиальный кабель с медной «изоляцией»

Н. — Ты упомянул о коаксиальном кабеле, а у меня как раз заготовлен один вопрос на эту тему. У меня сложилось впечатление, что в радиолокаторах не очень часто применяют этот кабель. Чем это объяснить?

Л. — Дело в том, что в радиолокаторах нужно передавать на высоких частотах большую мощность с минимальными потерями. В коаксиальном кабеле сложность возникает из-за необходимости крепления внутреннего проводника строго в середине внешнего. Использование для этой цели какого-либо изоляционного материала вызывает значительные потери энергии.

Н. — Какой же тогда изоляционный материал лучше всего поставить в коаксиальный кабель?



Л. — В этом случае я рекомендую тебе воспользоваться медью.

Н. — Ты что, смеешься надо мною? Я хотел бы знать, кого из нас двоих здорово стукнули коаксиальным кабелем по голове!

Л. — Я прекрасно понимаю твое удивление. Но не забывай, что здесь нам приходится иметь дело с очень высокими частотами. В коаксиальном кабеле можно сделать для внутреннего проводника медную опору, длина которой равна четверти длины волны колебания, передаваемого по кабелю (см. схематическое изображение на рис. 158). Конец этого четвертьволнового стержня замыкается накоротко с внешним проводником, и поэтому отраженная им волна возвращается в исходную точку

в фазе с проходящей там прямой волной. Все происходит так как если бы этот стержень-опора был разрезан в месте своего соединения с внутренним проводником.

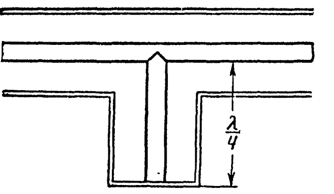
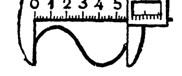


Рис. 158. Четвертьволновая опора для внутреннего проводника коаксиального кабеля.

Н. — Очень интересное решение. Я полагаю, что таким образом можно решить все проблемы передачи колебаний сверхвысокой частоты.

Л. — Увы, далеко не так. Описанную систему можно успешно применять только для передачи колебаний строго определенной частоты.

А в радиолокаторах часто бывает полезно изменять частоту. Коаксиальный же кабель даже с четвертьволновыми опорами изоляторами далек от совершенства, и поэтому предпочтение отдают трубе обычно прямоугольного сечения, по которой волна проходит в результате многократных непрерывных отражений от стенок. Такое устройство называют волноводом.



Многорезонаторный клистрон

Н. — А теперь я хотел бы спросить тебя, что такое клистрон и как он работает.

Л. — Давай для начала рассмотрим усилительный клистрон с двумя резонаторами. Для этого тебе предварительно нужно познакомиться с объемным резонатором типа румбатрон (так называются резонаторы клистрона). Посмотри на рис. 159

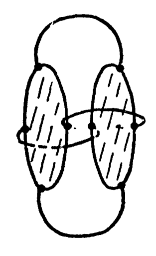


Рис. 159. Две круглые пластинки, соединенные некоторым количеством петель, образуют объемный резонатор.

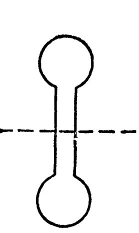


Рис. 160. Разрез румбатрона (объемного резонатора клистрона) по его оси.

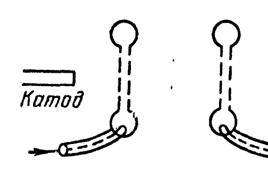


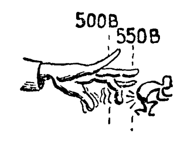
Рис. 161. Схема двухрезонаторного клистрона. Первый резонатор модулирует электроны по скорости. В пространстве между двумя резонаторами электроны группируются в пакеты и затем возбуждают второй резонатор; на анод поступает лишь постоянный ток.

и ты легко поймешь, как он устроен: ты видишь две параллельно расположенные круглые пластины, образующие конденсатор. Пластины соединены между собой множеством проволочных петель, которые образуют паралелльно соединенные катушки. Бесконечно увеличивая число проволочных петель, мы получим объемный резонатор, сечение которого я изобразил для тебя на рис. 160. По внешнему виду он напоминает покрышку авто-

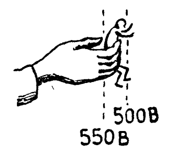
мобильной шины, между бортами которой натянули круглые куски ткани.

Н. — Положительно, необходимо привыкнуть к совершенно необычному виду этих колебательных контуров, используемых в технике сверхвысоких частот. И внутри этих резонаторов электроны танцуют свою румбу?

Л. — Да, если тебе нравится такое сравнение. Но правильнее было бы сказать, что электромагнитные поля заставляют электроны исполнять свой танец. Посмотри на рис. 161, чтобы понять, как это происходит. Катод испускает электроны, а анод их собирает. Между этими электродами я поместил два объемных резонатора. Плоские стенки этих резонаторов сделаны из сетки, чтобы электроны могли проходить сквозь них.



Предположим, что с помощью петли связи я возбуждаю первый резонатор небольшим напряжением сверхвысокой частоты, которое порождает в резонаторе колебания на его резонансной частоте. При прохождении электронов через две сетки резонатора они ускоряются (когда вторая сетка положительна относительно первой) или замедляются (при обратном соотношении потенциалов сеток).



Н. — Это должно породить невообразимую неразбериху. Электроны то ускоряются, то замедляются и в конечном итоге они все должны перепутаться!

Л. — Ты не так далек от истины. Если оставить достаточное расстояние, чтобы быстро летящие электроны смогли догнать двигающиеся медленно, то электроны сгруппируются в пакеты. При расчете клистрона стараются создать такие условия, чтобы наилучшая группировка электронов приходилась на момент их подхода к сеткам второго объемного резонатора. Проходя через второй резонатор, пакеты электронов отдают ему свою энергию и порождают в нем колебания значительно более мощные, чем те, которые использовались для возбуждения первого резонатора.

Н. — Так, значит, клистрон представляет собой усилительную лампу?

Л. — Да, есть клистроны-усилители. Такие лампы позволяют получить наибольшие мощности в импульсе на сверхвысоких частотах. В настоящее время на частоте 3 *Ггц* удается получить 30 000 *квт* в импульсе.



Но клистрон можно использовать и как генератор. Если выходной резонатор синфазно (без сдвига фазы) соединить с входным, то устройство начинает генерировать.

Н. — Но в этой лампе довольно трудно изменить частоту, так как для этого пришлось бы одновременно изменять настройку обоих резонаторов.

Отражательный клистрон

Л. — Чтобы избавиться от этого недостатка, создали так называемый отражательный клистрон. Эта лампа имеет только один резонатор, на котором создается высокий положительный потенциал, а анод заменен электродом с большим отрицательным потенциалом. Электроны, вылетающие с катода, проходят через резонатор и приближаются к отрицательному электроду, тормозятся им и возвращаются к резонатору. В результате электроны второй раз проходят через резонатор, который, таким образом, выполняет роль и первого и второго резонаторов; при обеспечении необходимой связи лампа начинает генерировать. Отражательные клистроны используются преимущест-

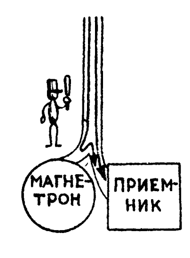
венно в качестве гетеродинов радиолокационных приемнико супергетеродинного типа. В этом случае гетеродин создае колебания небольшой мощности, необходимые для возникно вения биений с принимаемым колебанием.

Н. — И для этого полученные с клистрона колебания по дают на сетку лампы, а на ее другую сетку подают колебания принятые антенной?

Л. — На таких высоких частотах не рекомендуется поль зоваться этим методом. Обычно колебания клистрона-гетеро дина направляют в объемный резонатор (кусок волновода) куда вводят также и волновод, идущий от приемной антенны В том месте, где эти две волны сходятся, помещают крохотный кристаллический детектор, представляющий собой нелинейный элемент, необходимый для выделения биений этих двух волн В цепи кристалла получают колебания промежуточной частоты (равной разности частот колебаний гетеродина и принимаемого сигнала). Полученные колебания промежуточной частоты уси ливают классическим транзисторным или ламповым усили телем.

Переключение «передача — прием»

Н. — Ты только что говорил о приемной антенне. А почему радиолокаторы имеют всего лишь одну антенну?



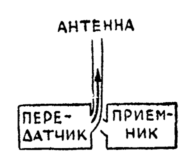
Л. — Правильно, антенна одна; сначала она используется для передачи, а затем для приема. Такое использование антенны приводит к весьма сложным проблемам: мощность излучаемых колебаний может превысить тысячу киловатт, тогда как прием-ник способен обнаружить миллионную долю микроватта. Для защиты приемника от разрушения излучаемым колебанием создали очень остроумную систему из газоразрядных ламп, заполненных газом под низким давлением, которые размещены в волноводах на пути прохождения волны или в стенке волно-вода. Во время передачи, когда по волноводам проходит очень большая мощность, газ в лампе ионизируется. В этих условиях он уподобляется очень хорошему проводнику — закрывает волновод, соединяющий антенну с приемником, и в последний практически ничего не попадает. При приеме отраженного сиг-нала его мощность настолько мала, что газ больше не ионизи-руется, волновод открыт и принимаемая волна свободно про-ходит в приемник. Другая газоразрядная лампа находится на стенке волновода между магнетроном и разветвлением волно-вода; она не пропускает к магнетрону принимаемую волну. Эта лампа размещена сбоку от пути следования волны, и поэтому в отличие от лампы, находящейся в ответвлении волновода к приемнику, не пропускает волну, если находящийся в ней газ не ионизирован.

Н. — Зачем понадобилось не пропускать принимаемую волну к магнетрону? Ведь она не может его разрушить.

Л. — Разумеется, нет. Но, если не сделать такого запора, часть принимаемой волны оказалась бы потерянной для прием-ника, а энергии поступает так мало, что напрасно транжирить ее просто глупо. Благодаря размещению газоразрядных ламп непосредственно в волноводе или на его стенке вся принимаемая энергия отраженного сигнала поступает в приемник[1].

[1] Разрядники обычно называются: РЗП — раз-рядник защиты приемника; РБП — разрядник блокировки передатчика. (*Прим. ред.*)

Н. — В самом деле, система автоматического разделения гналов сделана исключительно интересно. Но теперь я хотел ı спросить тебя, как в радиолокаторе стабилизируют напря-:ние питания. В блок-схеме радиолокатора, которую я смот-л, имеется несколько блоков питания, но я не понял, как и устроены.



Стабилизация напряжения с помощью диода Зенера

Л. — Ты, Незнайкин, уже немного знаешь об устройстве оков стабилизации напряжения; вспомни, в частности, что ı с тобой говорили о диодах Зенера.

Н. — Наш разговор об этих диодах я помню, но я не вижу, ік их можно использовать для стабилизации напряжения.

Л. — Их просто-напросто нужно включить параллельно ıтаемой схеме, как я показал на рис. 162. Как ты видишь, од Зенера потребляет ток, который питаемая схема не по-ебляет. Когда потребление этой схемы изменяется, проте-ющий по диоду Зенера ток меняется в противоположном правлении. Напряжение пита-ıя *U* устанавливают несколько ıше требующегося напряже-ıя, и избыточная мощность ıссеивается на резисторе *R*. ıутреннее сопротивление дио-Зенера значительно меньше противления *R*, и поэтому ачительно уменьшает изме-ния напряжения на выводах ода и питаемой схемы.

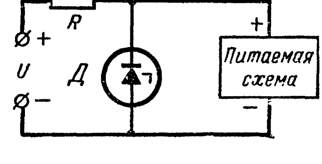


Рис. 162. Стабилизация напряжения с помощью диода Зенера.

Н. — Принцип работы этого стабилизатора полностью ıалогичен принципу работы стабилизатора на газоразрядных ıмпах Но я подозреваю, что полупроводниковые приборы ıзволяют получить более совершенную схему.

Л. — И ты, Незнайкин, не ошибся. Здесь можно исполь-вать систему автоматического регулирования, во многом ıхожую на сервомеханизм, которая с помощью отрицательной ıратной связи поддерживает выходное напряжение неизменным; я этого стабилизатор сравнивает выходное напряжение с опор-ıм (контрольным) напряжением, усиливает полученное в ре-льтате этого сравнения отклонение и воздействует выходным гналом усилителя на объект регулирования.

Н. — Объяснение несколько туманно. Я предпочел бы ıнкретный пример.

Стабилизатор напряжения

Л. — Пожалуйста, посмотри схему, которую я подготовил я тебя на рис. 163. Напряжение *U* через резистор R_3 подает- на диод Зенера *Д*, на котором создается спорное напря-:ние.

Чтобы регулировать напряжение *E*, мы с помощью потен-ıометра R_4 снимем лишь часть опорного напряжения и по-дим его на базу транзистора T_2. Часть стабилизируемого ıходного напряжения *E* через делитель напряжения $R_1 - R_2$

подается на эмиттер транзистора T_2. Если выходное напряжение E становится слишком высоким или слишком низким, то часть его, подаваемая на эмиттер, будет соответственно отличаться от части опорного напряжения на базе T_2. Транзистор T_2 запирается или проводит. Его коллекторный ток, представляющий собой усиленное напряжение ошибки, подается на базу транзистора T_1. Связь между транзисторами очень проста, так как транзистор T_1 относится к типу *p-n-p*. Представь себе, что в силу каких-либо причин питаемая напряжением E схема имеет тенденцию потреблять слишком много. Тогда напряжение E снизится. Такое изменение произойдет и с потенциалом эмиттера транзистора T_2, что вызовет увеличение коллекторного тока транзистора T_2. Этот ток, проходя через базу транзистора T_1, значительно повысит ток в цепи коллектора транзистора T_1, что скомпенсирует первоначальное нарушение равновесия.

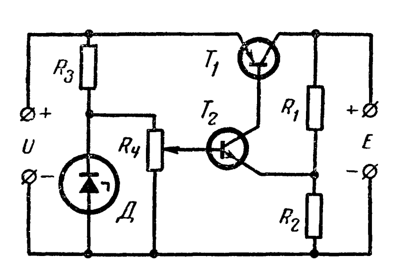


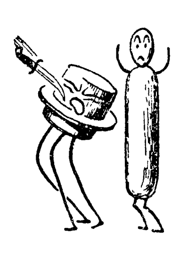
Рис. 163. Стабилизатор напряжения на транзисторах. Опорным напряжением служит часть напряжения, снимаемого с диода Зенера; транзистор T_2 усиливает напряжение ошибки; T_1 — мощный транзистор.

Н. — В этом стабилизаторе меня беспокоит то обстоятельство, что транзистор T_1 выдерживает всю разность напряжений U и E и одновременно должен рассеивать большую мощность.

Л. — Мы должны взять мощный транзистор и установить его на хорошем радиаторе, способном рассеивать соответствующее количество тепла. Соблюдая необходимые меры, можно легко рассеивать на транзисторе мощность более 30 *вт*, что превышает возможности большинства ламп, которые ты до сих пор использовал.

Н. — В самом деле это превосходный стабилизатор напряжения, он весьма прост и в то же время обладает широкими возможностями. Вероятно, я в ближайшее время сделаю себе такой стабилизатор.

Л. — Ты получишь очень хорошие результаты, если примешь некоторые меры предосторожности. Не забывай, что стабилизатор не имеет защиты от короткого замыкания. Если ты замкнешь его выводы нагрузкой с слишком низким сопротивлением, транзистор T_1 может выйти из строя.



Н. — Я полагаю, что для предотвращения таких серьезных неприятностей достаточно поставить плавкий предохранитель.

Л. — Теперь, кажется, есть плавкий предохранитель, реагирующий достаточно быстро. Обычно же транзистор гибнет раньше предохранителя и тем самым спасает его. Если же ты хочешь надежно оградить себя от неприятностей, то нужно дополнить стабилизатор напряжения относительно простой схемой на трех транзисторах, которая играет роль триггера и почти мгновенно (через несколько микросекунд) после перенапряжения отключает выходное напряжение. Я не буду ее описывать, так как она отличается некоторой сложностью, но разобраться в ней совсем нетрудно. Все необходимые подробности ты можешь найти в полных схемах самой различной аппаратуры.

Сельсины

Н. — Я с некоторым недоверием отношусь к схемам, которые ты называешь сложными, но понятными, и тем не менее я думаю, что мне удастся с ней справиться. А теперь я хотел бы спросить тебя, что такое сельсин. Я часто слышал это слово и, в частности, встречал его в брошюре о радиолокаторе.

Л. — Сельсин — небольшая электрическая машина, очень похожая на электродвигатель, она служит для передачи угла поворота вала. В неподвижной части (статор) имеются три обмотки (рис. 164) B_1, B_2 и B_3, расположенные под углом 120° друг к другу. Подвижная часть (ротор) имеет только одну обмотку, создающую магнитное поле, перпендикулярное оси ротора. Выводы этой обмотки соединены с двумя кольцами к которым прижимаются две щетки.

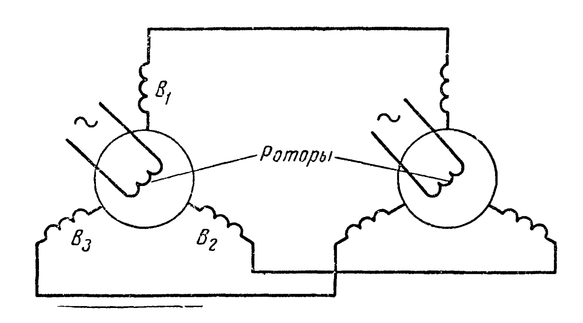
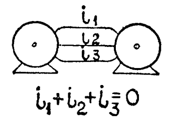


Рис. 164. Пара сельсинов, используемых для передачи угла поворота вала с помощью трех напряжений различной амплитуды, наводимых ротором сельсина-датчика в трех обмотках статора сельсина-приемника.

Н. — Эта машина действительно немного похожа на электродвигатель, но я не вижу, как ее можно использовать для передачи положения.

Л. — Представь себе, что мы имеем два одинаковых сельсина. Я соединил, как это показано на рис. 164, все три обмотки статора первого с соответствующими обмотками второго...

Н. — А, нет! С этим я не согласен. Ты действительно соединил один вывод каждой обмотки первого сельсина с выводом соответствующей обмотки второго, но при этом накоротко замкнул вторые выводы всех трех обмоток первого сельсина и такую же операцию проделал со вторыми выводами обмоток второго сельсина. Я согласился бы с использованием одного общего провода для этих выводов, но при условии, если общий провод одного статора будет соединен с общим проводом другого статора.



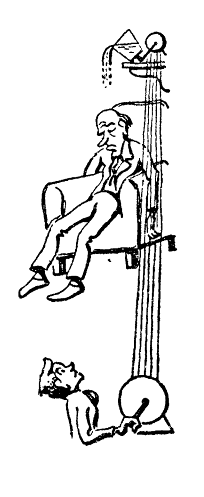
Л. — В этом нет необходимости. Можно доказать, что напряжения в обмотках таковы, что их алгебраические суммы постоянно равны нулю. Поэтому нет надобности соединять между собой общие точки этих обмоток. А теперь подадим переменное напряжение в обмотку ротора первого сельсина. Во всех трех обмотках статора появятся наведенные напряжения, амплитуды которых зависят от положения ротора. Эти три напряжения передаются на три соответствующие обмотки второго сельсина и создают три вектора магнитного поля, которые,

складываясь, дают одно результирующее, направленное точн так же, как породившее его магнитное поле первого сельсина

Теперь можно двумя способами использовать второй сельсин. Мы можем подать в его ротор такое же напряжение, како подается в ротор первого (обычно переменное напряжение 90–100 *в* с частотой 50 *гц*). Тогда в результате взаимодействия магнитного поля ротора второго сельсина с магнитными полями обмоток его статора ротор займет точно такое же положение что и ротор первого сельсина.

Н. — Я понял, как работает система, но я не вижу разницы между управляющим и управляемым сельсинами.

Л. — Ты прав, что не видишь разницы — ее действительно нет. Передача может происходить в обоих направлениях. Все происходит так, как если бы для передачи движения с одного сельсина на другой использовали длинный гибкий вал. Если ты силой помешаешь вращению ротора второго сельсина, то почувствуешь соответствующее сопротивление на роторе первого. Это система передачи положения, а не система автоматического регулирования. Обычно ею пользуются для перемещения вторым сельсином стрелки по шкале. Система очень удобна в тех случаях, когда при передаче угла необходимо обеспечить вращение по всему кругу без мертвого угла; ею удачно заменяют рассмотренные нами ранее системы на потенциометрах.



Но картина будет совершенно другая, если я не подам тока в ротор второго сельсина и если я поверну его рукой. Как ты думаешь, что в этом случае произойдет?

Н. — Я думаю, что в его обмотке появится наведенное напряжение.

Л. — Совершенно верно. А как оно будет изменяться?

Н. — Я думаю, что оно будет изменяться при вращении ротора. Напряжение, несомненно, должно быть очень высоким, когда ротор расположен так, что магнитное поле хорошо проходит по его виткам. И оно, вероятно, будет очень низким, когда ротор расположен так, что магнитное поле не может проходить по его виткам.

Л. — Совершенно правильно, отдавая дань строгости выражений, я хочу уточнить. Наведенное напряжение равно нулю, когда витки ротора расположены параллельно магнитному полю, создаваемому тремя обмотками статора. Это направление перпендикулярно тому, которое занимает ротор при подаче в него такого же напряжения, что и в обмотку ротора первого сельсина, как мы только что делали.

Мы можем подать напряжение с этого второго ротора на усилитель, а затем на специальный фазочувствительный детектор, который даст нам положительное или отрицательное напряжение в зависимости от того, в какую сторону смещен ротор от положения, соответствующего наибольшей величине наводимого в этом роторе напряжения.

Н. — Мне в голову пришла одна идея...

Л. — Так изложи ее, мне кажется, что ты сегодня в очень хорошей форме.

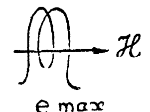
Н. — Незачем говорить об этом, я всегда такой. Если это напряжение ротора соответствующим образом усилить и затем подать на двухфазный двигатель, то его можно заставить вращаться в одном или в другом направлении.

Л. — Совершенно верно, и этим пользуются на практике. Но как при использовании твоего метода, так и при использовании уже описанного мной двигателя постоянного тока, управляемого фазочувствительным детектором, этот двигатель всегда используется для воздействия на ротор сельсина, чтобы

удерживать его в таком положении, когда наведенный в обмотке этого ротора ток ничтожно мал.

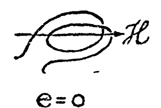
Н. — А какими преимуществами обладает этот метод по сравнению с первым?

Л. — На этот раз передача необратима. Первый сельсин выступает в роли управляющего органа, а второй — в роли управляемого. Необходимо отметить, что в этом случае мощность на роторе сельсина приемника зависит только от усилителя и управляемого им двигателя. Этот метод позволяет поворачивать в нужное положение очень тяжелые предметы, обладающие большой инерцией. Поэтому такая система передачи угла часто используется для управления радиолокационными антеннами.



Н. — В принципе очень удобно, что эту сельсинную систему можно применять несколькими различными способами. К тому же второй сельсин также может применяться двумя разными способами, о которых ты мне рассказал.

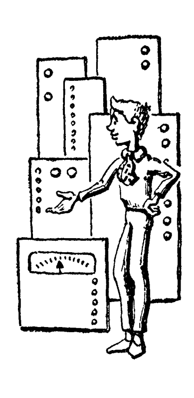
Л. — Теоретически все это возможно, а на практике предпочитают в известной мере специализировать сельсины. Существуют специальные сельсины-датчики, которые устроены так, чтобы подключаемые к их обмоткам нагрузки не изменяли наводимых в них напряжений. У сельсинов-приемников, предназначенных для индикации передаваемого угла, как я тебе уже говорил, принимают специальные меры для демпфирования колебаний ротора. В тех же сельсинах, которые предназначены для использования в системе автоматического регулирования с двигателем, стальная арматура ротора должна быть очень однородной, чтобы ротор не оказывал никакой реакции на обмотки сельсина-передатчика. В сельсинах, используемых для прямой передачи угла без двигателя, приводящего в движение второй сельсин (такую систему передачи называют телеиндикацией), нет необходимости в исключительной однородности стального сердечника ротора. Этот ротор устанавливается в заданное положение магнитным полем и поэтому совершенно не влияет на сельсин-датчик.



Цифровые кодирующие устройства

Н. — В брошюре о радиолокаторе я обнаружил описание еще одного странного устройства. Там говорилось о передаче положения с помощью «цифровых кодирующих устройств». Что это такое?

Л. — Это устройства, связанные с осью и передающие сведения о положении в цифровой, обычно в двоичной, форме. Такое устройство, например, можно сделать в виде диска, разделенного на концентрические кольца (дорожки), каждое из которых состоит из прозрачных и непрозрачных участков (рис. 165). По одну сторону диска располагают ряд ламп, каждая из которых освещает небольшой участок выделенной ей дорожки, а по другую сторону диска напротив ламп размещают фотоэлементы. Когда между лампой и фотоэлементом находится прозрачный участок кольцевой дорожки, фотоэлемент дает напряжение, а когда луч света перекрывается непрозрачным участком, напряжения на выводах фотоэлемента нет. Путем соответствующего размещения прозрачных и непрозрачных зон на кольцевых дорожках можно сделать так, что даваемые фотоэлементами напряжения составят число, в двоичной системе позволяющее точно определить положение оси.



Здесь уместно вспомнить о проведенном нами ранее сравнении цифровой и аналоговой вычислительной техники. Система передачи данных в цифровой форме представляет интерес для

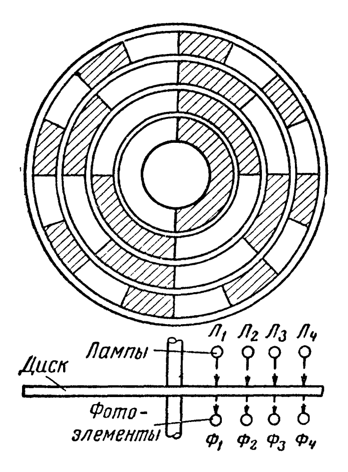


Рис. 165. Кодирующий диск состоит из прозрачных и непрозрачных зон. В зависимости от угла поворота диска лампы $Л_1$, $Л_2$, $Л_3$ и $Л_4$ освещают или не освещают соответствующие фотоэлементы *Ф*. Последние по проводам, число которых соответствует числу кольцевых дорожек, передают в двоичном коде информацию об угле поворота диска.

передачи большого количества цифр, характеризующих с высокой точностью те или иные явления. В тех случаях, когда особой точности не требуется, вполне достаточно передачи непрерывно изменяющихся величин, как, например, трех напряжений с разной амплитудой в трех обмотках сельсина.

Грандиозные проекты

Н. — Я очень рад услышать объяснения принципа работы этих цифровых кодирующих устройств. Они позволят мне решить проблему, над которой я в последнее время работаю: один из моих приятелей попросил сделать ему автоматическую систему управления станком по заданной программе. Я установлю на станке такое цифровое кодирующее устройство. Переданное им число запишу на сдвигающий регистр. Последний позволит мне сложить это число с числом из программы, записанной в магнитном запоминающем устройстве...

Л. — Я знал, что ты в прекрасной форме, Незнайкин, но я никогда не подозревал, что ты стал так силен! Положительно, для тебя электроника...

Н. — Электроника?... Нет ничего проще!

Вместо послесловия. Письмо Любознайкина Незнайкину

Дорогой друг!

Мы очень давно не виделись, причина, вероятно, заключается в том, что все время отнимает создание системы программного управления станком. Тем не менее я считаю необходимым упорядочить все то, о чем мы говорили во время наших бесед, и поэтому я предлагаю тебе нечто вроде предметного указателя.

Как ты помнишь, твоя неудача с системой охраны от воров побудила меня рассказать тебе о **датчиках** (стр. 8), затем попытаться дать определение электроники (стр. 10) и, наконец, посоветовать тебе в виде подготовки к нашим последующим беседам перечитать небольшой учебник по электротехнике.

Во второй беседе (стр. 12) мы убедились, что использование датчика может оказаться необходимым даже в тех случаях, когда изучаемое явление само по себе уже электрическое: мы увидели, как преобразуют постоянные напряжения в переменные, чтобы облегчить их усиление (стр 13), и какие методы используют для измерения очень высоких напряжений (стр. 14). Мы рассмотрели датчики магнитного поля (стр. 17) и **тензометрические датчики** (стр. 19), которые позволяют измерять приложенную силу. Мы также познакомились с системами, в которых используются **вибрирующая струна** (стр. 22) и **пьезоэлектрические датчики.**

В третьей беседе (стр. 24) мы говорили об ускорении (стр. 25) и об **акселерометрах** (стр. 26). Мы говорили о датчиках звука или **микрофонах** (стр. 27), рассмотрели датчики, чувствительные к температуре (в том числе **терморезисторы** — стр. 28 и **термопары**) и к свету, — здесь мы начали с вакуумных **фотоэлектрических элементов** (стр. 30), перешли к **газонаполненным элементам** (стр. 32), **фоторезисторам**, **фотодиодам** и закончили **фотоумножителями** (стр. 33).

Во время нашей четвертой беседы (стр. 36) я объяснил тебе строение атомного ядра (**протоны и нейтроны**) и рассказал,

что такое изотопы (стр. 37). Мы познакомились с природой **ядерных излучений**; с альфа-, бета- и гамма-лучами (стр. 38) и со средствами для их измерения: с **ионизационной камерой**, а также со счетчиком **Гейгера-Мюллера** (стр. 40) и со **сцинтилляционным** счетчиком (стр. 40).

Начав с ядерных излучений, мы совершили краткий экскурс в электрохимию ионов. Я объяснил тебе, что такое pH (стр 44) и как измерять этот показатель с помощью **стеклянного электрода** (стр. 46), и затем рассказал об окислительно-восстановительном потенциале.

Когда мы встретились в пятый раз (стр. 50), мы приступили к изучению собственно электронной части интересующих нас систем. Мы начали с **усилителя**, и я показал тебе, как расширяют его полосу пропускания в сторону высоких и в сторону низких частот, попутно я напомнил тебе, что такое **децибелы** (стр. 52).

В ходе нашей шестой беседы (стр. 62) мы рассмотрели, как повысить входное сопротивление усилителя, в частности благодаря использованию **электрометрической** лампы (стр. 63), и как снизить выходное сопротивление (стр. 66) с помощью катодного повторителя (стр. 67), схемы с общим коллектором (стр. 70) и с помощью суперэмиттерного повторителя или схемы с общим **супер-коллектором** (стр. 72).

Когда мы встретились в седьмой раз (стр. 76), мы говорили о таком изменении формы сигнала, как **ограничение** (стр 78), о схеме, осуществляющей такую операцию с сигналом, о симметричном усилителе (стр. 79) и особенно о схеме, называемой триггером Шмитта (стр. 81). Полученные сигналы с крутыми фронтами мы подавали на **дифференцирующую** (стр. 85) и **интегрирующую** схемы (стр. 88). Для облегчения понимания роли этих схем я рассказал тебе, что такое производная (стр. 90) и интеграл (стр. 91).

Во время нашей восьмой встречи (стр. 94) мы познакомились с **умножителем частоты** (стр. 96) сначала для сигналов одной определенной, а затем и для сигналов любой частоты (стр. 98) Чтобы дать тебе возможность делить частоту, мне пришлось рассказать о **мультивибраторе** (стр. 99), а затем о его использовании для деления частоты на четное число (стр. 103). Последнее побудило меня рассмотреть вместе с тобой, как устроена бистабильная схема Экклеса-Джордана (стр. 105), которая облегчила тебе понимание схемы с одним устойчивым состоянием или **одновибратора** (стр. 110).

Во время нашей девятой встречи (стр. 115) ты узнал, что такое амплитудный **дискриминатор** (стр 116) и **селектор** (стр. 117).

Наша десятая беседа (стр. 122) была посвящена различным восстановителям; мы начали с **реле** (стр 123), перешли к **двигателю постоянного тока** (стр. 128) и закончили **двигателем переменного тока** (стр. 132).

Когда мы встретились в одиннадцатый раз (стр. 147), ты захотел узнать, что такое **виброгенераторы** (стр. 148), **пьезоэлектрические** (стр. 149) и **магнитострикционные** (стр. 151) **генераторы ультразвука.** Занявшись источниками модулированного света, мы рассмотрели **фототелеграф** (стр. 152), а затем **лазер** (стр. 154).

Во время нашей двенадцатой встречи (стр. 161) ты узнал, как осуществляется электронный счет сначала в двоичной системе счисления (стр. 162), а затем и в десятичной (стр. 165), а также как осуществляется индикация полученного результата (стр. 161).

Прежде чем приступить к ознакомлению с цифровыми электронными вычислительными машинами, тебе в начале нашей тринадцатой беседы пришлось немного потренироваться в сложении по правилам двоичной арифметики (стр. 179), а затем я рассказал тебе о **логических схемах** (стр. 181), которые позволили нам создать **полусумматор** (стр. 183) и **сдвигающий регистр** (стр. 185).

Встретившись в четырнадцатый раз (стр. 190), мы были уже подготовлены к изучению полной схемы **двоичного сумматора** (стр. 191) и **умножителя** (стр. 194). Для выполнения вычислений необходимы **запоминающие устройства,** и я показал тебе, как работают запоминающие устройства на **ферритовых тороидальных сердечниках** (стр. 197) и на **туннельных диодах** (стр. 201).

В ходе нашей пятнадцатой беседы (стр. 204) я рассказал тебе о **системах автоматического регулирования** (стр. 205), об их демпфировании (стр. 206) и о **сервомеханизмах** вообще (стр. 209). Мы говорили об одном типе систем автоматического регулирования — об **усилителе с отрицательной обратной связью** (стр. 211).

На наше шестнадцатое заседание (стр. 219) ты пришел с оригинальным проектом **аналогового умножителя** (стр. 220), который заставил меня рассказать тебе об **операционных** усилителях (стр. 223), а затем и вообще об **аналоговой вычислительной технике** (стр. 227).

Наша семнадцатая встреча (стр. 231) преследовала цель дать ответы на твои вопросы относительно **сверхвысоких частот** и, в частности, о получении таких частот с помощью **магнетрона** (стр. 232), об их передаче по **коаксиальному кабелю с четвертьволновыми изоляторами** (стр. 233) и о смешивании их с колебаниями постоянной частоты, создаваемыми **клистроном** (стр. 234). Мы познакомились также с **антенным переключателем** (стр. 236), который поочередно подключает радиолокационную антенну то к передатчику, то к приемнику. Знакомясь с вспомогательными устройствами радиолокатора, мы рассмотрели **стабилизаторы** напряжения питания (стр. 237) и **системы передачи угла** на сельсинах (стр. 239).

В этот момент, отстранив все сомнения, ты занялся осуществлением своего грандиозного проекта создания системы программного управления. Я поздравляю тебя с твоим смелым начинанием.

Ни ты, ни я не можем претендовать на то, что за семнадцать наших бесед мы разобрали «всю электронику». Но я надеюсь, что немного помог тебе ознакомиться с этой увлекательной бурно развивающейся наукой, которая обусловливает жизнь современного мира. Именно по этой причине тебе необходимо постоянно держать себя в курсе событий и ежедневно, как делаю я сам, продолжать изучать электронику.

Если во время такой «постоянной переподготовки» ты столкнешься с какими-либо трудностями, не стесняйся обратиться ко мне за советом. Я всегда отвечу, если это будет в моих силах, но я готов поспорить, что в один прекрасный день ты меня «перегонишь», а это тоже очень полезно, так как плох тот ученик, который не превзойдет своего учителя.

В ожидании твоих писем прошу тебя принять заверения в моей сердечной дружбе.

Твой друг Любознайкин

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Готовятся к печати следующие книги:

Радиолюбительские конструкции. (Указатель описаний). Изд. 5-е, полностью обновленное. 17 л. 50 000 экз. 82 к.

Скрипников Ю. Ф. Колебательный контур. 6 л. 40 000 экз. 24 к.

Мартынов Е. М. Бесконтактные переключающие устройства. 12 л. 40 000 экз. 48 к.

Ельяшкевич С. А. Телевизоры. (Справочные материалы). 28 л. 150 000 экз. 1 р. 22 к.

Капчинский Л. М. Телевизионные антенны. 8,5 л. 50 000 экз. 34 к.

Сотников С. К. Узлы и блоки любительских цветных телевизоров. 7 л. 60 000 экз. 28 к.

Володин А. А. Электронные музыкальные инструменты. 11 л. 30 000 экз. 44 к.

Курбатов Н. В. и Яновский Е. Б. Справочник по магнитофонам. 20 л. 150 000 экз. 90 к.

Данилочкин В. А. Налаживание любительских магнитофонов. 6 л. 50 000 экз. 24 к.

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 733

Ж.-П. ЭЙМИШЕН

ЭЛЕКТРОНИКА?..

Нет ничего проще!

Перевод с французского Ю. Л. СМИРНОВА

Семнадцать занимательных бесед, в которых в очень простой форме объясняются основы электроники и возможности ее использования в промышленности



Жан-Пьер Эймишен
Электроника?.. Нет ничего проще!

Редактор *И. С. Рыжак*
Переплет художника *А. М. Кувшинникова*
Технический редактор *Л. А. Пантелеева*
Корректор *Т. В. Воробьева*

Сдано в набор 20/VIII 1969 г. Подписано к печати 6/II 1970 г. Формат 60×90[1]/16 Бумага типографская № 2. Печ л 15,5. Уч-изд. л 18,49 Тираж 100 000 экз Цена 1 р. 05 к Зак 1107

Издательство «Энергия». Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» имени А М Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.